



TUGAS AKHIR (*Manufaktur*) - TM141585

**OPTIMASI MULTIRESPON GAYA TEKAN, TORSI,
KEKASARAN PERMUKAAN DAN KEAUSAN TEPI
PAHAT PADA PENGURDAN BAJA EMS-45
DENGAN *MINIMUM QUANTITY LUBRICATION*
(MQL)**

MUHAMMAD ARIZKY RAHMADILLAH MARGO AGUNG
NRP. 2113 106 017

Dosen Pembimbing
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM141585

MULTI-RESPONSE OPTIMIZATION OF THE THRUST FORCE, TORQUE, SURFACE ROUGHNESS AND TOOL WEAR OF THE DRILLING PROCESS OF EMS-45 STEEL WITH MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL)

MUHAMMAD ARIZKY RAHMADILLAH MARGO AGUNG
NRP. 2113 106 017

Academic Supervisor
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**OPTIMASI MULTIRESPON GAYA TEKAN, TORSI,
KEKASARAN PERMUKAAN DAN KEAUSAN TEPI
PAHAT PADA PENGURDAN BAJA PERKAKAS
EMS-45 DENGAN *MINIMUM QUANTITY*
*LUBRICATION (MQL)***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMMAD ARIZKY RAHMADILLAH M. A.
NRP. 2113106017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 1953 05 16 197803 1001 (Pembimbing I)
2. Ir. Winarto, DEA.
NIP. 1960 12 13 198811 1001 (Penguji I)
3. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.
NIP. 1960 06 23 198803 1002 (Penguji II)
4. Dr. Ir. Bustanul Arifin Noer, M.Sc.
NIP. 1959 04 03 198903 1001 (Penguji III)



SURABAYA
Juli, 2016

**OPTIMASI MULTIRESPON GAYA TEKAN, TORSI,
KEKASARAN PERMUKAAN DAN KEAUSAN TEPI
PAHAT PADA PENGURDAN BAJA EMS-45 DENGAN
MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL)**

Nama mahasiswa : Muhammad Arizky Rahmadillah M.A
NRP : 2113106017
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen pembimbing : Ir. Bobby O. P. S., M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Proses gurdi merupakan proses pemesinan yang sering dilakukan pada industri manufaktur, seperti industri otomotif dan pesawat. Penentuan kombinasi variabel proses yang tidak tepat pada proses gurdi akan menghasilkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan tingkat keausan pahat yang tinggi. Oleh karena itu perlu dilakukan pengaturan variabel-variabel proses gurdi dengan teknik minimum quantity lubrication (MQL) yang tepat, sehingga dapat meminimalkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat.

Suatu eksperimen telah dilakukan pada proses penguridian material baja EMS-45 dengan MQL. Rancangan percobaan yang digunakan berupa matriks ortogonal $L_{18}(2^1 \times 3^3)$ dan replikasi dua kali. Variabel atau faktor yang divariasikan adalah jenis pahat, sudut ujung pahat, kecepatan makan dan kecepatan spindle. Variasi jenis pahat memiliki dua level, sedangkan ketiga variabel yang lain memiliki tiga level. Optimasi dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi-grey relational analysis (GRA).

Berdasarkan hasil eksperimen, variabel proses yang memberikan persen kontribusi terbesar untuk mengurangi variansi total dari respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan pahat secara serentak adalah variabel proses gerak makan sebesar 89,92%, diikuti oleh variabel proses kecepatan potong sebesar 0,54%. Variabel proses jenis pahat dan sudut

ujung pahat memberikan kontribusi sebesar 0%. Pengaturan yang tepat untuk menurunkan respon secara serentak adalah jenis pahat menggunakan HSS-M2, sudut ujung pahat diatur pada 102° , gerak makan diatur pada 0,1 mm/rev dan kecepatan potong diatur pada 25 m/menit.

Kata kunci: gaya tekan, GRA, MQL, , keausan tepi pahat, kekasaran permukaan, Taguchi, torsi

MULTI-RESPONSE OPTIMIZATION OF THE THRUST FORCE, TORQUE, SURFACE ROUGHNESS AND TOOL WEAR OF THE DRILLING PROCESS OF EMS-45 STEEL WITH MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL)

Student name : Muhammad Arizky Rahmadillah M.A
NRP : 2113106017
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisor : Ir. Bobby O. P. S., M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Drilling process is one of machining process which is often done in the manufacturing industry, such as automotive and aircraft industry. An improper combination of the variables drilling process will produce a higher thrust force, torque, surface roughness, and the wear of the cutting tools. Therefore, an adjustment of the variables of drilling process with a proper minimum quantity lubrication (MQL) technique is needed, to minimize the thrust force, torque, surface roughness, and the flank wear of cutting tools.

An experiment has been performed on the drilling process of steel EMS-45 material with MQL technique. The layout of the experiment used is L_{18} orthogonal matrix ($2^1 \times 3^3$) with twice replication. The variables or factors that varied is the type of tools, the point angle of tools, feeding speed, and spindle speed. The variations in the type of tools has two levels, while the other three variables has three levels. The optimization is done by using the Taguchi-grey relational analysis (GRA) method.

Based on the result of the experiment, the process variable that provide the greatest percent of contribution to reduce the total variance of the thrust force, torque, surface roughness, and tool wear response simultaneously is the feeding speed process variable at 89,92%, followed by the cutting speed process variable at 0,54%. The type of tools and point angle of tools process variable

contributes 0%. The exact setting to reduce the response simultaneously is the by using HSS-M2 type of tool, using 102° for point angle of tools, using 0,1 mm/rev for feeding speed, and using 25 m/min for cutting speed.

Keywords: MQL, Taguchi, GRA, thrust force, torque, surface roughness, tool wear

KATA PENGANTAR

Segala puji hanya milik Allah. Saya bersaksi bahwa tiada Tuhan selain Allah. Rasa syukur penulis panjatkan atas segala nikmat, petunjuk, karunia dan pertolongan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**OPTIMASI MULTIRESPON GAYA TEKAN, TORSI, KEKASARAN PERMUKAAN DAN KEAUSAN TEPI PAHAT PADA PENGGURDIAN BAJA PERKAKAS EMS-45 DENGAN *MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL)***”. Tugas Akhir ini disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala bantuan dan dorongan serta dedikasinya yang telah membantu penyusunan Tugas Akhir ini hingga selesai. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Ayah, Ibu dan segenap keluarga penulis yang telah memberikan segalanya bagi penulis.
2. Bapak Ir. Bobby O.P. Soepangkat, M.Sc, Ph.D. sebagai dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
3. Bapak Ir. Winarto, DEA., Bapak Ir. Hari Subiyanto, M.Sc., dan Dr. Ir. Bustanul Arifin Noer, M.Sc, sebagai dosen penguji Tugas Akhir.
4. Bapak Indra Sidharta, S.T., M.Sc. selaku dosen wali penulis, terima kasih atas bantuannya selama ini.
5. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc. Eng. Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin yang telah menjadi ujung tombak dari kemajuan Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
6. Sahabat seperjuangan sependaritaan Yanuar, Adib, Kris, Rizky, Mbak Novi dan Bang Hanif.
7. Sahabat terbaik yang selalu ada memberikan dukungan dan semangat kepada penulis, Nadya Siagian.

8. Teman-teman seperjuangan Cherdol, Bos, Akbar, Faiz, Handy, Hendra, keluarga besar Makadipura2 dan wisudawan 114 lainnya.
9. Sahabat yang selalu membantu penulis untuk menyelesaikan tugas akhir, Sinta.
10. Teman-teman lab manufaktur Teknik Mesin-ITS, Pak Gianto, Mas Reza, Mas Faisal.
11. Seluruh teman-teman Lintas Jalur angkatan 2013 genap yang saling bahu-membahu menghadapi kerasnya ITS.
12. Semua pihak yang belum disebutkan oleh penulis.

Naskah Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan khususnya di bidang proses manufaktur.

Sebagai tanggung jawab atas segala kekurangan, penulis membuka diri untuk segala kritik dan saran yang konstruktif atas tulisan ini. Penulis juga berharap akan ada penelitian-penelitian selanjutnya yang dapat menyempurnakan dan memperbaiki segala kekurangan yang ada dalam penelitian ini. Kesempurnaan hanya milik Yang Maha Sempurna, Allah SWT.

Surabaya, Juli 2016
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan masalah	3
1.2.1 Batasan Masalah	4
1.2.2 Asumsi Penelitian	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 Proses Gurdi	9
2.2.2 Geometri Pahat	12
2.2.3 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi	13
2.2.4 Keausan Pahat	17
2.2.5 Kekasaran Permukaan	19
2.2.6 Temperatur Pemotongan	23
2.2.7 <i>Cutting Fluid</i>	25
2.2.8 <i>Minimum Quantity Lubrication</i> (MQL)	26
2.2.9 Metode Taguchi	27
2.2.9.1 Prosedur Eksperimen	28
2.2.10 Metode Taguchi-Grey <i>Relational Analysis</i> (GRA)	37
2.2.11 Interpretasi Hasil Eksperimen	42
2.2.12 Eksperimen Konfirmasi	43
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	45

3.1	Diagram Alir Penelitian	45
3.2	Variabel Penelitian	47
3.3	Karakteristik Respon Optimal	48
3.4	Alat dan Bahan Penelitian	49
3.4.1	Alat Penelitian	49
3.4.2	Bahan Penelitian	54
3.5	Pemilihan Matriks Ortogonal	57
3.6	Prosedur Percobaan	59
3.7	Pengukuran dan Pengambilan Data	63
3.7.1	Pengukuran dan Pengambilan Data Gaya Tekan dan Momen Torsi	63
3.7.2	Pengukuran dan Pengambilan Data Keausan Pahat	64
3.7.3	Pengukuran dan Pengambilan Data Kekasaran Permukaan	65
3.8	Pengerjaan Optimasi Multirespon	65
3.9	Eksperimen Konfirmasi	65
BAB 4.	HASIL DAN ANALISA DATA	67
4.1	Data Hasil Pengukuran	67
4.2	Optimasi Multirespon Taguchi-GRA	69
4.2.1	Perhitungan Rasio S/N	69
4.2.2	Normalisasi Rasio S/N	70
4.2.3	Perhitungan <i>Deviation Sequence</i>	72
4.2.4	Perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC) dan Grey Relational Grade	73
4.2.5	Kombinasi Variabel Proses untuk Respon Optimal	74
4.2.6	Analisis Variansi dan Persen Kontribusi	76
4.2.7	Prediksi Multirespon Optimal dan Interval Keyakinan	81
4.2.8	Eksperimen Konfirmasi	82
4.2.9	Perbandingan antara Respon Hasil Kombinasi Awal dengan Respon Hasil Kombinasi Optimum	86
4.3	Analisis Pengaruh Variabel Proses terhadap	

Masing-masing Respon	87
4.3.1 Pengaruh Variabel Proses terhadap Gaya Tekan	88
4.3.2 Pengaruh Variabel Proses terhadap Torsi	89
4.3.3 Pengaruh Variabel Proses terhadap Kekasaran Permukaan	89
4.3.4 Pengaruh Variabel Proses terhadap Keausan Pahat	90
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	91
5.1 Kesimpulan	91
5.2 Saran	92
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
RIWAYAT PENULIS	

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Elemen dasar proses gurdi (Rochim, 1993)	10
Gambar 2.2 Geometri pahat gurdi (<i>twist drill</i>) (Rochim, 1993)	12
Gambar 2.3 a) Teori pemotongan geram	14
Gambar 2.3 b) Arah gaya-gaya reaksi pemotongan (lingkaran gaya pemotongan)	14
Gambar 2.3 c) Analisa geram (Rochim, 1993)	14
Gambar 2.4 Gaya pemotongan pada proses gurdi (Rochim, 1993)	15
Gambar 2.5 Daerah pengukuran keausan tepi pahat (Lee dkk., 1998)	18
Gambar 2.6 Kurva keausan pahat potong (Rochim, 1993)	19
Gambar 2.7 Penyimpangan rata-rata aritmatika (Rochim, 1993)	20
Gambar 2.8 Parameter pada profil permukaan (Rochim, 2001)	21
Gambar 2.9 Sumber panas pada proses pemotongan (Yildiz & Nalbant, 2008)	23
Gambar 2.10 Distribusi temperatur pada geram dan pahat (Rochim, 1993)	24
Gambar 2.11 Temperatur pahat, geram, dan benda kerja pada proses freis (Rochim, 1993)	24
Gambar 2.12 Kekerasan berbagai jenis pahat sebagai fungsi temperatur (Kalpakjian & Schmid, 2001)	25
Gambar 2.13 <i>External MQL supply dan internal MQL supply</i> (Klocke, 2011)	27
Gambar 2.14 Sistem suplai MQL (Klocke, 2011)	27
Gambar 2.15 Langkah-langkah proses optimasi	38
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	45
Gambar 3.2 Mesin CNC <i>milling</i> EMCO VMC-200	49
Gambar 3.3 Unit MQL	50
Gambar 3.4 Skema sistem kerja unit MQL	50
Gambar 3.5 Dinamometer tipe 9272	51
Gambar 3.6 Akusisi data tipe 5697A	51

Gambar 3.7 <i>Charge amplifier</i> tipe 5070A	51
Gambar 3.8 Compaq presario CQ35-336TX	52
Gambar 3.9 Nikon <i>measurescope</i>	52
Gambar 3.10 <i>Precision drill grinder</i>	53
Gambar 3.11 Mitutoyo surfest SJ-310	53
Gambar 3.12 Mistar ingsut	54
Gambar 3.13 <i>Drill holder</i>	54
Gambar 3.14 a) Pahat HSS-M2	55
Gambar 3.14 b) Pahat HSS-M35 <i>Cobalt</i>	55
Gambar 3.15 Benda kerja EMS-45	56
Gambar 3.16 Dimensi benda kerja	56
Gambar 3.17 Pemasangan unit MQL	61
Gambar 3.18 Ilustrasi penempatan posisi <i>nozzle</i>	61
Gambar 3.19 Penempatan posisi <i>nozzle</i>	62
Gambar 3.20 Pemasangan benda kerja pada dinamometer	62
Gambar 3.21 Pemasangan instrumentasi dinamometer	62
Gambar 3.22 a) Grafik gaya tekan	63
Gambar 3.22 b) Grafik momen torsi	63
Gambar 3.23 Posisi pengukuran keausan pahat gurdi	64
Gambar 3.24 Skema proses pengukuran keausan pahat gurdi	64
Gambar 3.25 Daerah pengukuran kekasaran permukaan	65
Gambar 4.1 Grafik nilai rata-rata GRG pada masing-masing level variabel proses	75
Gambar 4.2 Plot interval keyakinan hasil optimasi dan Eksperimen konfirmasi	85

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Batas keausan kritis (Rochim, 1993)	18
Tabel 2.2 Nilai kekasaran dan tingkat kekasaran (Rochim, 2001)	21
Tabel 2.3 Nilai kekasaran yang dicapai oleh beberapa Pengerjaan (www.finetubes.co.uk)	22
Tabel 2.4 Tabel analisis variansi	33
Tabel 2.5 Penempatan rasio S/N	39
Tabel 2.6 Tabel respon <i>grey relational grade</i> (GRG)	41
Tabel 3.1 Total derajat kebebasan variabel proses dan levelnya	57
Tabel 3.2 Rancangan percobaan Taguchi	58
Tabel 3.3 Tampilan data hasil eksperimen	58
Tabel 3.4 Variabel proses dan levelnya	59
Tabel 4.1 Data hasil eksperimen	68
Tabel 4.2 Rasio S/N pada masing-masing respon	70
Tabel 4.3 Normalisasi rasio S/N	71
Tabel 4.4 Nilai <i>deviation sequence</i>	72
Tabel 4.5 Nilai GRC dan GRG	74
Tabel 4.6 Nilai rata-rata GRG	75
Tabel 4.7 Kombinasi variabel proses untuk respon optimal	76
Tabel 4.8 ANAVA untuk GRG	77
Tabel 4.9 ANAVA dan persen kontribusi untuk GRG	80
Tabel 4.10 Hasil eksperimen konfirmasi pada masing-masing respon	83
Tabel 4.11 Rasio S/N eksperimen konfirmasi	83
Tabel 4.12 Normalisasi rasio S/N eksperimen konfirmasi	83
Tabel 4.13 <i>Deviation sequence</i> masing-masing respon	84
Tabel 4.14 GRG eksperimen konfirmasi pada kombinasi optimum	84
Tabel 4.15 Kombinasi variabel proses untuk kombinasi awal	86
Tabel 4.16 Hasil respon dengan menggunakan kombinasi awal	87

Tabel 4.17 Perbandingan respon dengan menggunakan kombinasi awal dengan kombinasi optimum	87
Tabel 4.18 Persen kontribusi variabel proses terhadap respon Individu	88

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keausan pahat adalah suatu permasalahan yang tidak bisa dihindari dalam suatu proses pemesinan. Keausan pahat terjadi karena kenaikan temperatur akibat adanya gesekan antara pahat dan geram yang dihasilkan selama proses pemesinan. Untuk mengurangi laju keausan pahat maka diperlukan penggunaan *cutting fluid* pada proses pemesinan/pemotongan logam.

Penggunaan *cutting fluid* bertujuan untuk mengurangi panas yang timbul pada daerah pemotongan, menurunkan gaya potong, serta menurunkan kekasaran permukaan. Salah satu teknik penggunaan *cutting fluid* adalah dengan pemberian cairan *coolant*, namun usaha ini masih menyisakan permasalahan karena menyebabkan limbah industri yang sulit ditangani. Penggunaan *coolant* sebagai *cutting fluid* pada proses pemesinan juga dapat mempengaruhi biaya total produksi. Oleh karena itu mulai dilakukan proses pemesinan *semi-dry* yang memerlukan sedikit *cutting fluid* dan ramah lingkungan.

Salah satu teknik *semi-dry* adalah *minimum quantity lubrication* (MQL). Pada teknik MQL, penggunaan *cutting fluid* yang diberikan pada pahat sangat kecil, yaitu kurang dari 50 ml/jam, sehingga benda kerja, pahat mesin, tatal, dan lingkungannya tetap relatif kering (Klocke, 2011). Menurut Dhar dkk. (2005) MQL adalah penggunaan *cutting fluid* yang dialirkan dengan jumlah yang sangat kecil (50-500 ml/jam) pada aliran udara bertekanan.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mempelajari efektivitas teknik MQL. Dhar dkk. (2005) meneliti tentang pengaruh MQL terhadap keausan pahat dan kekasaran permukaan pada proses bubut baja AISI-4340. Penelitian dilakukan pada proses bubut dengan kondisi *dry*, *wet*, dan MQL. Parameter proses yang digunakan adalah kecepatan makan, gerak makan dan kedalaman pemotongan. Tekanan udara yang digunakan untuk

suplai MQL adalah sebesar 7 bar dan laju aliran yang digunakan adalah sebesar 60 ml/h. Unit MQL yang digunakan adalah tipe *external nozzle*. Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian Dhar dkk. adalah bahwa penggunaan MQL pada proses bubut dapat menurunkan temperatur pemotongan dan menurunkan keausan pahat serta meningkatkan umur pahat jika dibandingkan dengan proses pemesinan pada kondisi *dry* dan *wet*.

Bhowmick dan Ahmet (2010) melakukan penelitian yang berhubungan penggunaan teknik *dry* dan MQL pada proses gudi material *cast magnesium alloy* (AM60). Fluida MQL yang digunakan adalah *distilled water spray* (H₂O-MQL) dan *fatty acid-base* (FA-MQL). Bhowmick dan Ahmet (2010) menyimpulkan pemotongan dengan menggunakan MQL menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan proses pemotongan dengan teknik *dry*. Torsi dan gaya tekan mendapatkan respon yang seragam dari kedua fluida yang diamati (H₂O-MQL dan FA-MQL), tanpa ada peningkatan torsi secara mendadak selama proses gudi berjalan. Dicapai pula permukaan lubang yang halus sebagai tambahan keuntungan dari penggunaan MQL.

Metode Taguchi sangat populer untuk memecahkan masalah optimasi pada bidang rekayasa manufaktur. Metode ini menggunakan desain eksperimen yang disebut matriks ortogonal dan rasio S/N untuk mengoptimasi fungsi tujuan yang akan dioptimalkan dalam eksperimen. Terdapat tiga kategori dari karakteristik kualitas, yaitu *smaller is better* yang digunakan saat nilai yang semakin kecil diinginkan, *nominal the best* yang digunakan saat nilai yang dituju diinginkan dan *bigger is better* yang digunakan saat nilai yang semakin besar diinginkan. Kelebihan metode Taguchi adalah dapat digunakan meneliti jumlah besar dari variabel-variabel dengan jumlah eksperimen yang sedikit (Vankanti dan Ganta, 2013). Metode Taguchi hanya mampu memecahkan masalah optimasi dengan respon tunggal, akan tetapi pada kenyataannya kebanyakan permasalahan yang timbul adalah bersifat multirespon. Pada optimasi multirespon, menaikkan atau memperbaiki satu respon akan menyebabkan perubahan pada

respon yang lain (Soejanto, 2009). Untuk mengatasi keterbatasan ini, beberapa peneliti menggabungkan metode Taguchi dengan *grey rational analysis* (GRA). *Grey relational analysis* (GRA) yang didasarkan pada teori sistem *grey* dapat digunakan untuk mengatasi kekurangan informasi yang tidak lengkap dan tidak jelas (Deng, 1989). Melalui GRA, *grey relational grade* (GRG) diperoleh untuk mengevaluasi respon yang jumlahnya banyak. Sebagai hasilnya, optimasi dari respon yang berjumlah banyak dapat diubah menjadi optimasi dari satu *relational grade* (Lin dan Lin, 2002)

Untuk mengetahui lebih lanjut efektifitas dari penggunaan MQL, maka akan dilakukan penelitian tentang pengaruh teknik MQL pada proses gurdi, terhadap gaya tekan, torsi, keausan tepi pahat dan kekasaran permukaan selain itu juga akan dilakukan optimasi untuk mengetahui pengaturan yang tepat dari variabel-variabel proses dan geometri pahat pada proses gurdi agar dapat meminimumkan respon yang diamati secara bersamaan, serta untuk mengetahui performa dari jenis pahat yang digunakan pada penelitian ini. Hasil dari penelitian akan diberikan kepada PT X sebagai penyedia pahat gurdi yang digunakan pada penelitian ini. Rancangan eksperimen ditetapkan berdasarkan metode Taguchi. Metode optimasi yang digunakan adalah Taguchi-GRA.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apakah variabel-variabel proses gurdi (kecepatan potong dan kecepatan makan) dan geometri pahat (sudut ujung pahat) serta jenis pahat memiliki kontribusi untuk menurunkan variansi secara serentak dari respon gaya tekan, torsi, keausan pahat dan kekasaran permukaan pada proses penggurdian material baja EMS-45.
2. Bagaimana pengaturan yang tepat dari variabel-variabel proses, geometri pahat dan jenis pahat pada proses gurdi sehingga dapat meminimumkan respon gaya tekan, torsi,

keausan pahat dan kekasaran permukaan secara bersamaan pada penggurdian material baja EMS-45.

1.2.1 Batasan Masalah

Untuk mengkonsentrasikan pembahasan maka penelitian ini dibatasi dengan batasan sebagai berikut:

1. Tidak membahas masalah biaya selama proses pemesinan
2. Tidak menghitung waktu pemesinan selama proses pemesinan
3. Mesin yang digunakan adalah CNC *milling* EMCO VMC-200.
4. Material benda kerja yaitu EMS-45.
5. Pahat gudi terbuat dari HSS-M2 dan HSS-M35 yang memiliki diameter 10 mm.
6. Pahat gudi yang digunakan adalah *twist drill*.
7. Pahat gudi memiliki 2 alur/*flute*.
8. Cairan MQL menggunakan minyak nabati (minyak sawit, tanpa campuran).
9. *Dynamometer* yang digunakan dari produk KISTLER tipe 9272.

1.2.2 Asumsi Penelitian

Adapun asumsi-asumsi yang diberlakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel-variabel yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Tidak ada interaksi antar variabel
3. Material benda kerja maupun pahat memiliki komposisi kimia dan mekanik yang homogen.
4. Mesin dan operator bekerja dalam kondisi baik selama proses pemesinan
5. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui besar kontribusi dari variabel-variabel proses gurdi (kecepatan potong dan kecepatan makan) dan geometri pahat (sudut ujung pahat) serta jenis pahat untuk menurunkan variansi secara serentak dari respon gaya tekan, torsi, keausan pahat dan kekasaran permukaan pada proses penggurdian material baja EMS-45.
2. Mengetahui pengaturan yang tepat dari variabel-variabel proses, geometri pahat dan jenis pahat pada proses gurdi agar dapat meminimumkan respon gaya tekan, torsi, keausan pahat dan kekasaran permukaan secara bersamaan pada penggurdian material baja EMS-45.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang bisa diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

Sebagai bahan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang pengaruh teknik pendinginan *minimum quantity lubrication* (MQL) terhadap keausan pahat, gaya pemotongan, dan kekasaran permukaan benda kerja pada proses gurdi. Sebagai masukan serta informasi dalam meningkatkan kualitas produk dari proses gurdi terkait dengan penggunaan MQL.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Keausan pahat adalah suatu permasalahan yang tidak bisa dihindari dalam suatu proses pemesinan. Penyebab terjadinya keausan pahat adalah karena adanya kenaikan temperatur sebagai akibat dari adanya gesekan antara pahat dan geram yang dihasilkan selama proses pemesinan. Dampak dari keausan pahat adalah dapat menyebabkan terjadinya kenaikan gaya tekan, torsi, temperatur pemotongan dan kekasaran permukaan, yang dapat mempengaruhi kualitas dari sebuah produk.

Salah satu usaha untuk menurunkan laju keausan pahat adalah dengan teknik *minimum quantity lubrication* (MQL), yaitu dengan mengalirkan *cutting fluid* dalam jumlah yang sangat kecil pada aliran udara bertekanan (Braga dkk., 2001), sehingga dapat mengurangi gaya tekan, torsi, temperatur pemotongan dan kekasaran permukaan yang dapat menjadikan kualitas produk menjadi lebih baik.

Kelly dkk. (2001) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh penggunaan *minimum quantity lubrication* (MQL) pada proses gudi baja paduan aluminium ACP 5080 dengan ketebalan 30 mm dan kekerasan 85 HB, menggunakan pahat gudi HSS *twist drill* dengan diameter 10 mm. Teknik penggunaan *cutting fluid* yang digunakan adalah *wet machining* dengan laju aliran 5,2 l/menit, kecepatan potong 105 m/menit, kecepatan makan 0,15 mm/rev dan *minimum quantity lubrication* (MQL) yang menggunakan minyak nabati sebagai *cutting fluid*, dengan laju aliran 20 ml/jam, tekanan udara 6 bar, kecepatan potong 25 m/menit, dan kecepatan makan 0,30 mm/rev. Kesimpulan dari penelitian tersebut adalah penggunaan *wet machining* menghasilkan nilai gaya potong, torsi, temperatur pemotongan dan kekasaran yang lebih kecil dibandingkan dengan *minimum quantity lubrication*, namun penggunaan *minimum quantity lubrication* (MQL) lebih baik karena nilai gaya potong, torsi, temperatur

pemotongan dan kekasaran permukaan yang dihasilkan tidak terpaut jauh dengan nilai yang dihasilkan *wet machining* dan juga penggunaan *cutting fluid* yang lebih sedikit, sehingga teknik pendinginan *minimum quantity lubrication* (MQL) dapat dinyatakan sebagai teknik pendinginan masa depan.

Penelitian juga dilakukan oleh Bhowmick dan Ahmet (2010) tentang pengaruh penggunaan teknik *dry* dan *minimum quantity lubrication* pada proses gurdi material *cast magnesium alloy* (AM60). Pahat gurdi yang digunakan adalah jenis HSS *twist drill* dengan diameter 6,35 mm. Fluida MQL yang digunakan adalah *distilled water spray* (H₂O-MQL) dan *fatty acid-base* (FA-MQL). Variabel proses yang digunakan pada kondisi *dry* adalah kecepatan potong (1000, 1500, 2000, 2500 rpm) dan kecepatan makan (0,10; 0,15; 0,20; 0,25 mm/rev) dan variabel proses yang digunakan pada MQL adalah kecepatan potong sebesar 2500 rpm, kecepatan makan 0,25 mm/rev dan laju aliran *cutting fluid* 10 ml/jam. Bhowmick dan Ahmet (2010) menyimpulkan pemotongan dengan menggunakan MQL menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan proses pemotongan dengan teknik *dry*. Torsi dan gaya tekan mendapatkan respon yang seragam dari kedua fluida yang diamati (H₂O-MQL dan FA-MQL), tanpa ada peningkatan torsi secara mendadak selama proses gurdi berjalan. Dicapai pula permukaan lubang yang halus sebagai tambahan keuntungan menggunakan MQL.

Rahim dkk. (2010) meneliti pengaruh minyak sawit sebagai MQL *cutting fluid* pada proses gurdi kecepatan tinggi dengan material baja paduan titanium. Penelitian dilakukan dengan menggunakan baja paduan titanium Ti-6Al-4V dengan diameter dan ketebalan sebesar 50 mm dan 40 mm, pahat gurdi yang digunakan adalah pahat *carbide drill* dengan diameter 14 mm. Laju aliran *cutting fluid* yang digunakan adalah 10 ml/jam dan tekanan udara 0,2 MPa. Kondisi pemesinan yang digunakan adalah *flood cutting fluid*, MQLSE (minyak sawit), MQLPO (*synthetic ester*) dan *air blow*. Variabel proses yang digunakan pada kondisi *flood* dan *air blow* adalah kecepatan potong 60 m/menit dan kecepatan

makan 0,1 mm/rev. Variabel proses yang digunakan pada kondisi MQLSE dan MQLPO adalah kecepatan potong (60, 80, 100 m/menit) dan kecepatan makan (0,1 dan 0,2 mm/rev). Rahim dkk. (2010) menyimpulkan bahwa teknik *flood cutting fluid* dapat digantikan dengan teknik MQL yang dapat mengurangi polusi dan meningkatkan keselamatan dan kesehatan. Penggunaan MQLPO memiliki biodegradasi yang lebih baik dibandingkan MQLSE dan juga dapat meningkatkan kemampuan pendinginan dan pelumasan dibandingkan dengan MQLSE, sehingga disimpulkan minyak sawit (MQLPO) dapat menggantikan *synthetic ester* (MQLSE) sebagai *cutting fluid*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Proses Gurdi

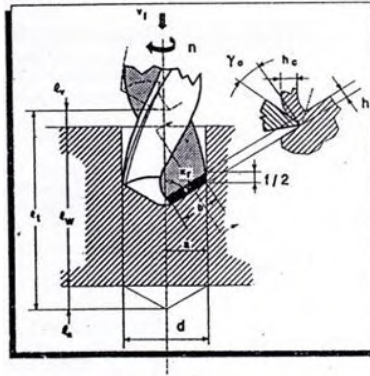
Proses gurdi (*drilling*) adalah proses pembuatan lubang silindris (*cylindrical hole*) pada benda kerja dengan menggunakan pahat gurdi jenis penggurdi puntir (*twist drill*). Pahat gurdi adalah sebuah pahat pemotong yang ujungnya berputar dan memiliki sisi potong dan galur yang berhubungan secara berkesinambungan disepanjang badan pahat gurdi. Galur ini, yang dapat berbentuk lurus atau *helix*, disediakan untuk memungkinkan lewatnya geram dan fluida pendingin. Pada proses ini, pahat gurdi berputar dan menekan ke bawah untuk melakukan proses pemakanan ke dalam benda kerja. Pada proses pemotongan terjadi gerak relatif dan persinggungan antara pahat dan benda kerja yang menghasilkan geram.

Karakteristik yang menentukan pada proses gurdi sedikit berbeda dengan proses pemesinan yang lain karena:

- Geram harus keluar dari lubang yang dibuat.
- Geram yang keluar dapat menyebabkan masalah ketika ukurannya besar dan atau kontinyu.
- Proses pembuatan lubang bisa sulit jika membuat lubang yang dalam.

- Untuk pembuatan lubang dalam pada benda kerja yang besar, cairan pendingin dimasukkan ke permukaan potong melalui tengah mata pahat gundi.

Elemen dasar dari proses penggurdian pada material benda kerja ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Elemen dasar proses gundi (Rochim, 1993)

Menurut Rochim (1993) elemen-elemen dasar proses gundi meliputi:

A. Pahat potong

a. Kecepatan Potong

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/menit)} \quad (2.1)$$

b. Gerak makan per-mata potong

$$f_z = \frac{V_f}{n \cdot z} \text{ (mm/putaran)} \quad (2.2)$$

c. Kedalaman potong persisi potong

$$a = \frac{d}{2} \text{ (mm)} \quad (2.3)$$

d. Lebar pemotongan

$$b = \frac{d}{2 \cdot \sin(K_r)} \text{ (mm)} \quad (2.4)$$

e. Luas pemotongan

$$A = a.b \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.5)$$

f. Kecepatan penghasilan geram

$$Z = \frac{\pi.d^2.V_f}{4 \times 1000} \text{ (cm}^3\text{/menit)} \quad (2.6)$$

Dengan:

d = Diameter pahat potong

z = Jumlah gigi (mata potong)

V_f = Kecepatan makan

K_r = Sudut potong utama

B. Benda kerja

$$L_t = L_v + L_w + L_n \quad (2.7)$$

Dengan:

L_t = Panjang total langkah pemotongan (mm)

L_v = Langkah awal pemotongan (mm)

L_w = Panjang pemotongan benda kerja (mm)

L_n = Panjang langkah akhir pemotongan (mm)

$$L_n > \frac{r}{2 \cdot \tan(K_r)}$$

C. Mesin perkakas gurdi

a. Putaran poros utama mesin

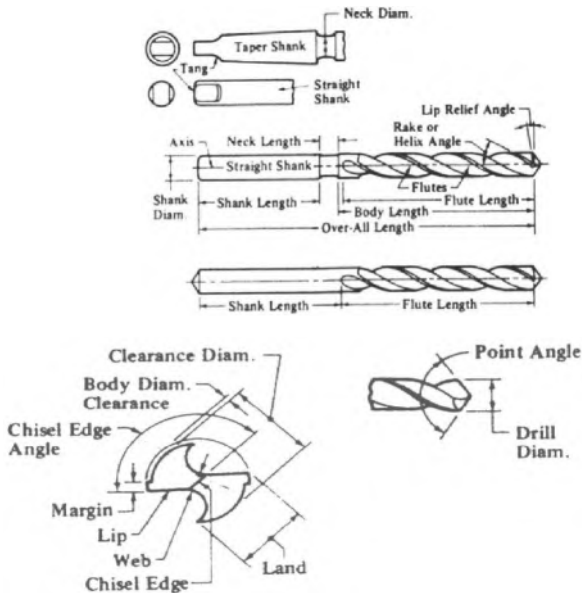
$$n = \frac{1000.V}{\pi.d} \text{ (putaran/menit)} \quad (2.8)$$

b. Waktu pemotongan

$$t_c = \frac{L_t}{V_f} \text{ (menit)} \quad (2.9)$$

2.2.2 Geometri Pahat

Sebagian besar dari proses gurdi dilakukan dengan menggunakan pahat gurdi berjenis *twist drill*. Nama-nama bagian pahat ini ditunjukkan pada Gambar 2.2. Di antara bagian-bagian pahat tersebut yang paling utama adalah sudut *helix* (*helix/rake angle*), sudut ujung pahat/sudut potong utama (*point angle/lip angle*) dan sudut bebas (*clearance angle*).



Gambar 2.2. Geometri pahat gurdi (*twist drill*) (Rochim, 1993)

Bagian-bagian utama dari *twist drill* adalah *body* (badan pahat), *point* (bagian dari ujung yang runcing) dan *shank* (tangkai). *Twist drill* dapat diklasifikasikan menurut materialnya, jenis tangkainya, jumlah *flute*, ukuran diameter dan geometri pahatnya.

Berdasarkan jenis tangkainya, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

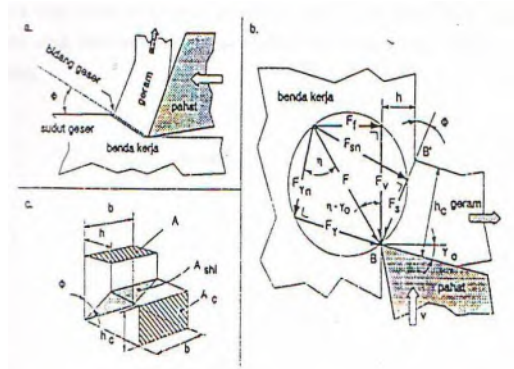
1. *Straight shank drill*, jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk silinder.
2. *Taper shank drill*, jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk konis, yang sesuai untuk dipasang langsung pada spindel mesin.

Berdasarkan jumlah *flute*, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Single flute drill*, pahat ini mempunyai satu *flute* dan digunakan untuk proses *drill* pada material plastik.
2. *Two flute drill*, pahat ini merupakan tipe *drill* konvensional.
3. *Three flute drill*, pahat ini merupakan tipe *twist drill* yang relatif baru dikembangkan pada proses pemotongan logam (*metal cutting*).

2.2.3 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi

Pemotongan pada proses pemesinan dianggap sebagai akibat dari timbulnya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh gaya tekan dari mata potong pahat. Tegangan pada benda kerja tersebut mempunyai orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan menimbulkan tegangan geser yang maksimum. Apabila tegangan geser tersebut melebihi kekuatan bahan benda kerja maka akan terjadi deformasi plastis pada daerah tegangan yang dirambatkan oleh gerakan pahat. Deformasi plastis ini menggeser dan memutuskan material benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser, sehingga terbentuk geram (Rochim, 1993). Gambar 2.3 menunjukkan pembentukan geram akibat tegangan geser yang dilakukan pahat terhadap benda kerja yang diambil dari lingkaran Merchant.



Gambar 2.3. a). Teori pemotongan geram b). Arah gaya-gaya reaksi pemotongan (lingkaran gaya pemotongan) c). Analisa geram (Rochim, 1993)

Gaya potong adalah gaya yang menimbulkan tegangan geser yang menghasilkan deformasi plastis pada bidang geser. Pada perhitungan teoritik diasumsikan bahwa deformasi material benda kerja dalam proses pemotongan terjadi dalam dua dimensi, dan tegangan terdistribusi secara merata pada bidang geser. Berdasarkan analisis geometrik dari lingkaran gaya seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3.b, persamaan dari gaya potong teoritik F_v adalah:

$$F = \frac{F \cos(\eta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \eta - \gamma_0)} (N) \quad (2.10)$$

Dengan:

$$F_v = F \cos(\eta - \gamma_0) \quad (2.11)$$

$$F_s = F \cos(\phi + \eta - \gamma_0) \quad (2.12)$$

F adalah gaya total dan F_s adalah gaya geser yang mendeformasikan material pada bidang geser sehingga melampaui batas elastik. F_s dapat ditentukan dengan menggunakan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi, yaitu:

$$F_s = A_{shi} \tau_{shi} (N) \quad (2.13)$$

Dengan:

$$A_{shi} = A / \sin \Phi = \text{penampang bidang geser (mm}^2\text{)}$$

Luas pemotongan adalah:

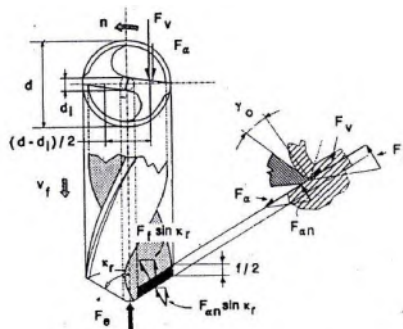
$$A = \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \quad (\text{mm}^2) \quad (2.14)$$

Dengan demikian gaya potong dapat dirumuskan sebagai:

$$F_v = \tau_{shi} A \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} \quad (\text{N}) \quad (2.15)$$

$$F_v = \tau_{shi} \cdot \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} \quad (\text{N}) \quad (2.16)$$

Pada proses gurdi yang menggunakan pahat dengan dua mata potong, gaya pemotongan pada salah satu mata potong dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu F_v dan F_f , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. F_f adalah gaya makan yang searah dengan kecepatan makan. Penekanan yang terjadi pada proses gurdi berfungsi untuk melawan gaya ekstruksi yang cukup besar diujung pahat gurdi (karena kecepatan potong diujung pahat gurdi sama dengan nol, maka tidak terjadi pemotongan melainkan penekanan atau ekstruksi benda kerja), serta untuk melawan gesekan pada bidang utama atau mayor bagi kedua mata potong.



Gambar 2.4. Gaya pemotongan pada proses gurdi
(Rochim, 1993)

Berdasarkan Gambar 2.4, dapat diturunkan persamaan gaya tangensial, yaitu:

$$F_t = F_v + F_a \text{ (N)} \quad (2.17)$$

F_a adalah gaya gesek pada bidang utama, yang tergantung pada gaya gesek spesifik persatuan panjang aktif mata potong (k_f (N/mm)). Gaya gesek ini dipengaruhi oleh geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan. Persamaan gaya gesek adalah:

$$F_a = K_f \frac{d - d_i}{2 \sin K_r} \text{ (N)} \quad (2.18)$$

Substitusi persamaan (2.17) dan persamaan (2.19) kedalam persamaan (2.18) menghasilkan persamaan gaya tangensial berikut ini:

$$F_t = \tau_{shi} \cdot \frac{d - d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} + K_f \frac{d - d_i}{2 \sin K_r} \text{ (N)} \quad (2.19)$$

Dengan:

- τ_{shi} adalah tegangan geser pada bidang geser (N/mm²)
- γ_0 adalah sudut geram
- η adalah sudut gesek
- Φ adalah sudut geser

Momen torsi yang diperlukan agar pahat potong dapat berputar adalah:

$$M_t = F_t \frac{d - d_i}{2} \text{ (Nmm)} \quad (2.20)$$

Gaya tekan yang diperlukan agar proses pemakanan dapat berlangsung adalah:

$$F_z = 2 F_f \sin K_r + 2 F_{an} \sin K_r + F_e \text{ (N)} \quad (2.21)$$

Dengan:

F_z = gaya tekan total untuk dua sisi potong

F_f = gaya makan

$$F_f = F_v \tan(\eta - \gamma_0) \quad (2.22)$$

F_{an} = gaya normal pada bidang utama potong, yang tergantung pada gaya normal spesifik persatuan panjang aktif mata potong (k_n (N/mm)) yang dipengaruhi oleh jenis geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan.

F_e = gaya ekstrusi yang terjadi di ujung pahat potong. Sesuai dengan penampang diameter inti d_i dari hasil percobaan, secara umum gaya ini bernilai sekitar 50% sampai 55% dari gaya tekan total (N).

Dengan demikian persamaan gaya tekan total adalah:

$$F_z = 4 \{ F_v \tan (\eta - \gamma_0) \sin K_r + k_n d - d_i / 2 \} \quad (N) \quad (2.23)$$

2.2.4 Keausan Pahat

Keausan pahat akan membesar dengan bertambahnya waktu pemotongan pada proses gudi, sampai suatu saat pahat dianggap tidak dapat lagi digunakan lagi, karena telah ada tanda-tanda tertentu yang menunjukkan bahwa umur pahat telah habis. Semakin besar keausan atau kerusakan yang terjadi pada pahat maka kondisi pahat akan semakin kritis. Jika pahat tersebut masih tetap digunakan maka pertumbuhan keausan akan semakin cepat dan pada suatu saat ujung pahat sama sekali akan rusak (Rochim, 1993). Keausan pahat potong akan dapat menimbulkan beberapa efek, antara lain:

- Kenaikan gaya potong.
- Getaran atau *chattering*.
- Penurunan kehalusan permukaan hasil pemesinan.
- Perubahan dimensi (geometri) produk.

Dalam prakteknya umur pahat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang berhubungan dengan proses pemesinan, yaitu: jenis material benda kerja dan pahat, kondisi pemotongan (kecepatan potong, kedalaman potong dan gerak makan), cairan pendinginan dan jenis proses pemesinan. Untuk menghindari kerusakan atau efek yang ditimbulkan karena keausan pahat, ditetapkan suatu harga batas keausan (dimensi dari keausan tepi atau keausan kawah) yang dianggap sebagai batas krisis dimana pahat tidak boleh digunakan. Tabel 2.1 memperlihatkan batas keausan yang

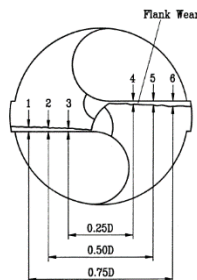
dijinkan bagi suatu jenis pahat yang digunakan untuk memotong suatu jenis benda kerja (Rochim, 1993).

Tabel 2.1 Batas keausan kritis (Rochim, 1993)

Pahat	Benda Kerja	VB (mm)	K
HSS	Baja dan Besi Tuang	0,3 s.d. 0,8	-
Karbida	Baja	0,2 s.d. 0,6	0,3
Karbida	Besi Tuang dan Non Ferrous	0,4 s.d. 0,6	0,3
Keramik	Baja dan Besi Tuang	0,3	-

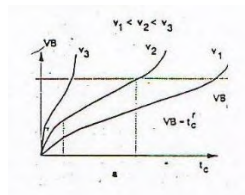
Dengan menggunakan kriteria saat habisnya umur pahat, maka umur pahat ditentukan mulai dengan pahat baru (setelah diasah) sampai pahat dianggap tidak bisa digunakan lagi. Dimensi dari umur pahat merupakan besaran waktu, yang dapat dihitung secara langsung maupun secara tidak langsung dengan mengkorelasikan terhadap besaran lain. Hal tersebut dimaksudkan untuk mempermudah prosedur perhitungan sesuai dengan jenis pekerjaan yang dilakukan.

Pengukuran keausan pada pahat gurdi dapat diamati seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Keausan pahat gurdi diukur pada sisi potong yang berkontak langsung dengan benda kerja. Hasil pengukuran keausan tepi pahat diperoleh dari nilai rata-rata enam daerah sisi potong pahat *dril* yang diukur menggunakan *measurescope*.



Gambar 2.5. Daerah pengukuran keausan tepi pahat (Lee dkk., 1998)

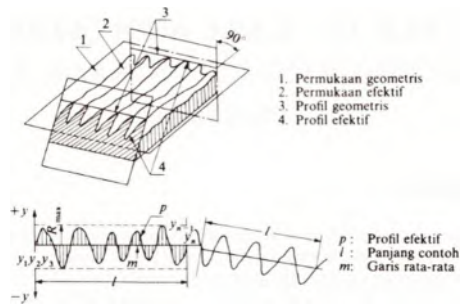
Pada dasarnya dimensi keausan menentukan batasan umur pahat sehingga kecepatan pertumbuhan keausan menentukan laju saat berakhirnya masa guna pahat. Pertumbuhan keausan tepi (*flank wear*) ditunjukkan pada Gambar 2.6. Keausan dimulai dengan pertumbuhan yang relatif cepat sesaat setelah pahat digunakan, diikuti pertumbuhan linier setaraf dengan bertambahnya waktu pemotongan.



Gambar 2.6. Kurva keausan pahat potong (Rochim, 1993)

2.2.5 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan produk hasil dari suatu proses pemesinan merupakan salah satu karakteristik kualitas yang kritis dalam bidang manufaktur maupun dalam perancangan komponen mesin. Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakteraturan konfigurasi permukaan pada suatu benda (Rochim, 2001). Kekasaran permukaan yang banyak digunakan adalah kekasaran rata-rata aritmatika. Kalpakjian (1984) menyatakan bahwa penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) merupakan jumlah rata-rata puncak tertinggi dan terendah dari setiap gelombang yang diukur pada panjang tertentu. Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) adalah harga rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya. Profil efektif merupakan garis bentuk dari potongan permukaan efektif oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris, permukaan efektif, profil geometris, dan profil efektif ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Penyimpangan rata-rata aritmatika (Rochim, 2001)

Harga R_a ditentukan dari nilai-nilai ordinat ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$) yang dijumlahkan tanpa memperhitungkan tandanya. Secara umum, R_a dirumuskan sebagai berikut:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.24)$$

Harga R_a tersebut dapat didekati oleh persamaan:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.25)$$

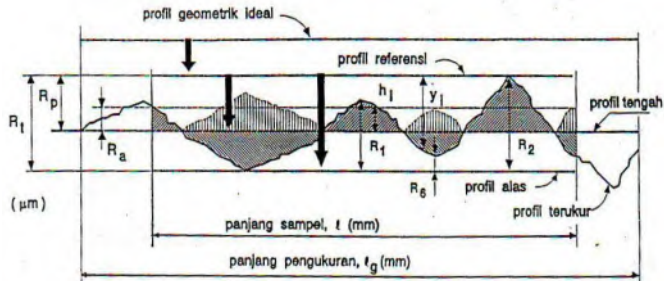
atau

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.26)$$

Dengan:

R_a = Nilai kekasaran aritmatika

Posisi R_a dan parameter kekasaran yang lain seperti bentuk profil, panjang sampel, dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Parameter pada profil permukaan (Rochim, 2001)

International Organization for Standardization (ISO) telah mengklasifikasikan nilai kekasaran rata-rata aritmatika (R_a) menjadi 12 tingkat kekasaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2. Angka kekasaran permukaan ini bertujuan untuk menghindari kemungkinan terjadinya kesalahan dalam menginterpretasikan satuan harga kekasaran permukaan. Dengan adanya satuan harga ini, kekasaran permukaan dapat dituliskan langsung dengan menyatakan harga R_a atau dengan menggunakan tingkat kekasaran ISO.

Tabel 2.2 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran (Rochim, 2001)

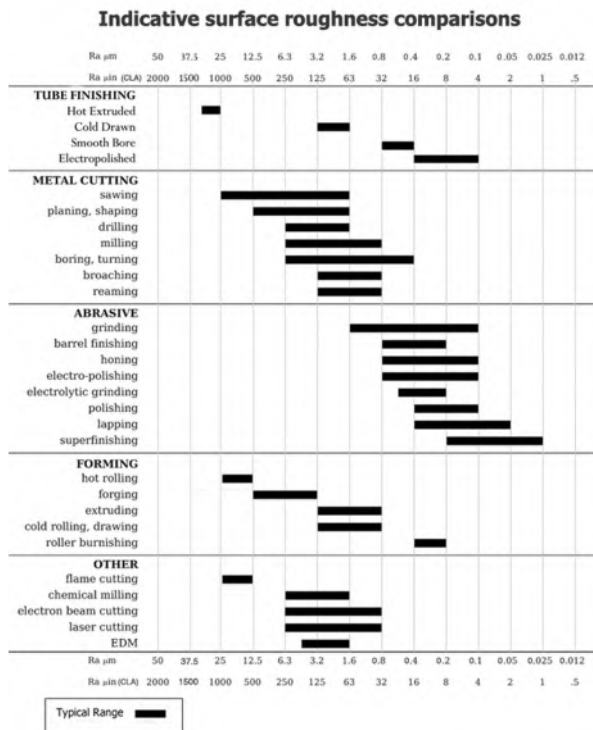
Kekasaran, R_a (μm)	Tingkat kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12,5	N10	2,5
6,3	N9	
3,2	N8	0,8
1,6	N7	
0,8	N6	
0,4	N5	
0,2	N4	0,25
0,1	N3	
0,05	N2	
0,025	N1	0,08

Faktor-faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan (Rochim, 2001) dapat berasal dari:

1. Parameter proses pemesinan, yaitu kecepatan potong, gerak makan dan kedalaman potong.
2. Geometri pahat, yaitu radius pojok dan sudut geram.
3. Sifat dari material benda kerja dan pahat.
4. Alat bantu dan cairan pendingin yang digunakan.
5. Jenis dan kualitas dari mesin yang digunakan.
6. Getaran antara pahat, benda kerja dan mesin.

Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai oleh beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai Kekasaran yang Dicapai oleh Beberapa Pengerjaan (www.finetubes.co.uk)



2.2.6. Temperatur Pemotongan

Hampir seluruh energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja (Rochim, 1993). Gambar 2.9 menunjukkan sumber panas selama proses pemotongan berlangsung. Panas yang terjadi selama proses pemotongan berlangsung, sebagian besar terbawa oleh geram, merambat melalui pahat dan sisanya mengalir menuju ke sekeliling melalui benda kerja. Akibat panas yang terjadi selama proses pemotongan cukup tinggi, maka temperatur pahat terutama bidang geram dan bidang utama cukup tinggi. Prosentase panas yang terbawa oleh geram, merambat melalui pahat dan benda kerja, adalah sebagai berikut (Rochim, 1993):

$$Q = Q_c + Q_s + Q_w \quad (2.27)$$

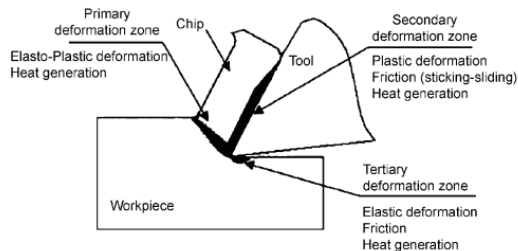
Dengan:

Q = Panas total yang dihasilkan (J/s atau W)

Q_c = Panas yang terbawa oleh geram dengan prosentase sekitar 75%

Q_s = Panas yang merambat melalui pahat dengan prosentase sekitar 20%

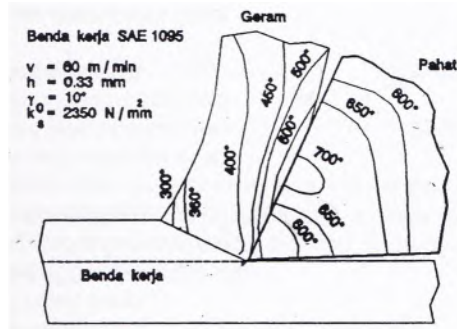
Q_w = Panas yang merambat melalui benda kerja dengan prosentase sekitar 5%



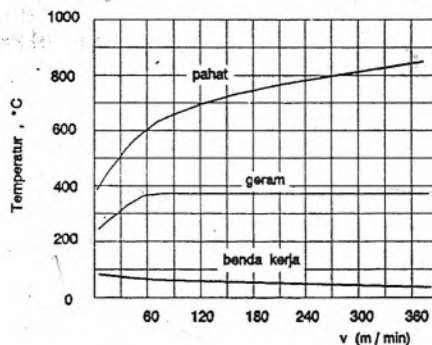
Gambar 2.9. Sumber panas pada proses pemotongan (Yildiz & Nalbant, 2008)

Temperatur pahat pada saat proses pemotongan berlangsung lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur yang terbawa geram.

Hal ini disebabkan karena pada saat proses pemotongan logam, geram yang dihasilkan bergesekan dengan pahat pada bidang geram sehingga panas yang dibawa oleh geram akan merambat menuju pahat. Distribusi temperatur pada ujung pahat ditunjukkan pada 2.10. Gambar tersebut menunjukkan bahwa temperatur tertinggi terjadi pada bidang geram pada daerah geram mulai lepas dengan permukaan pahat. Gambar 2.11 menunjukkan temperatur pahat (pada bidang geram), temperatur rata-rata geram dan temperatur benda kerja sebagai fungsi dari kecepatan potong.

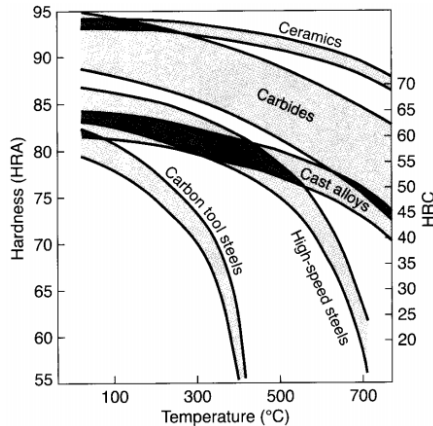


Gambar 2.10. Distribusi temperatur pada geram dan pahat (Rochim, 1993)



Gambar 2.11. Temperatur pahat, geram dan benda kerja pada proses freis (Rochim, 1993)

Peningkatan temperatur pahat selama proses pemotongan berlangsung dapat menurunkan kekerasan dari pahat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Kekerasan berbagai jenis pahat sebagai fungsi temperatur
(Kalpakjian & Schmid, 2001)

2.2.7. *Cutting Fluid*

Cutting fluid pada proses pemotongan logam berfungsi untuk menurunkan koefisien gesek antara pahat dengan geram pada bidang geram, menurunkan panas akibat adanya gesekan antara pahat dengan geram dan membersihkan geram pada permukaan benda kerja pada saat proses pemotongan berlangsung. Ada empat jenis *cutting fluid* yang biasa digunakan pada proses pemesinan, yaitu (Groover, 2010):

1. Minyak murni (i)

Minyak yang tidak dapat diemulsikan dan digunakan dalam bentuk sudah diencerkan. Minyak ini terdiri dari minyak mineral dasar atau minyak bumi, dan kadang mengandung pelumas yang lain seperti lemak, minyak tumbuhan, dan ester. Selain itu bisa juga ditambahkan aditif tekanan tinggi seperti *chlorine*, *sulphur* dan *phosphorus*. Minyak murni menghasilkan pelumasan terbaik,

akan tetapi sifat pendinginannya paling jelek diantara cairan pendingin yang lain.

2. Cairan sintetik (*synthetic fluids*)

Cairan sintetik tidak mengandung minyak bumi atau minyak mineral. Cairan ini dibuat dengan melarutkan borat, nitrit, nitrat atau fosfat kedalam air untuk mencegah korosi. Untuk menambah daya anti korosi, cairan sintetik ditambah amina atau amida. Cairan ini biasanya digunakan dalam bentuk sudah diencerkan (biasanya dengan rasio 3 sampai 10%). Keunggulan cairan sintetik adalah mempunyai daya pendingin yang tinggi, bahan dasar mudah larut dalam air dan tidak terjadi pertumbuhan bakteri.

3. Cairan emulsi (*soluble oil*)

Soluble oil akan membentuk emulsi ketika dicampur dengan air. Penambahan minyak nabati atau hewani dapat menaikkan daya lumas. Sedangkan penambahan sulfur, klorida, atau fosfor dapat menaikkan daya lumas pada tekanan dan temperatur tinggi. Cairan emulsi mempunyai daya lumas dan perlindungan terhadap korosi yang tinggi dibandingkan dengan cairan sintetik maupun semi sintetik.

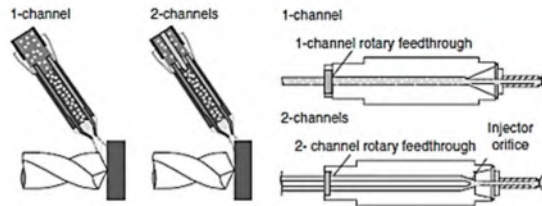
4. Cairan semi sintetik (Semi-synthetic fluids)

Merupakan kombinasi antara minyak sintetik dan *soluble oil*.

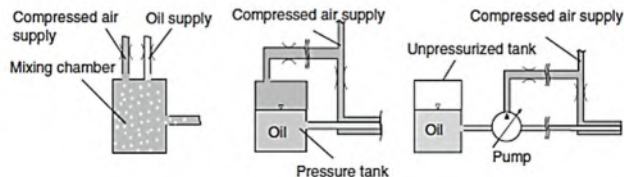
2.2.8. *Minimum Quantity Lubrication (MQL)*

MQL dapat didefinisikan sebagai suplai *cutting fluid* yang dibutuhkan dalam bentuk aerosol (Klocke, 2011). MQL adalah teknologi terkini dalam pemesinan untuk mendapatkan keunggulan dalam keselamatan, lingkungan dan ekonomi dengan mengurangi penggunaan *cutting fluid* dalam pemesinan. Pada MQL, *cutting fluid* dialirkan dengan jumlah yang sangat kecil pada aliran udara bertekanan (Braga dkk., 2001). *Cutting fluid* yang digunakan dalam MQL utamanya adalah *fatty alcohol* dan *ester oil* atau minyak nabati yang dimodifikasi kimiawi (Klocke, 2011). Metode suplai pada MQL ada dua, yaitu *external MQL supply* dan *internal MQL*

supply, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Sistem suplai MQL ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.13. *External MQL supply* dan *Internal MQL supply* (Klocke, 2011)



Gambar 2.14. Sistem suplai MQL (Klocke, 2011)

2.2.9 Metode Taguchi

Metode Taguchi yang diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taguchi merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses, dengan biaya dan *resources* seminimal mungkin. Soejanto (2009) lebih lanjut menambahkan bahwa metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan (*noise*), seperti material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia dan kondisi-kondisi operasional. Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat *robust* terhadap faktor-faktor gangguan tersebut. Oleh karena itu metode Taguchi juga disebut *robust design*.

Metode Taguchi menunjukkan pendekatan desain eksperimen yang dapat merancang suatu produk dan proses yang

robust terhadap kondisi lingkungan, mengembangkan kualitas produk yang *robust* terhadap variasi komponen, dan meminimalkan variasi di sekitar target. Metode Taguchi memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya.

Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain (Soejanto, 2009):

1. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.
2. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan *robust* terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

Namun demikian, metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks. Metode ini juga memiliki rancangan yang mengorbankan pengaruh interaksi yang cukup signifikan. Untuk mengatasi hal tersebut, pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Desain eksperimen adalah proses mengevaluasi dua faktor atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu (Soejanto, 2009). Untuk mencapai hal tersebut secara efektif, faktor dan level faktor dibuat bervariasi, hasil dari kombinasi pengujian tertentu kemudian diamati sehingga kumpulan hasil selengkapnya dapat dianalisis. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh dan tindakan untuk melakukan perbaikan lebih lanjut.

2.2.9.1 Prosedur Eksperimen

Secara umum, desain eksperimen Taguchi dibagi menjadi tiga tahap utama yang mencakup semua pendekatan eksperimen. Ketiga tahap tersebut adalah sebagai berikut (Ross, 2008):

1. Tahap perencanaan

Tahap perencanaan merupakan tahap terpenting. Pada tahap ini seseorang peneliti dituntut untuk mempelajari eksperimen-eksperimen yang pernah dilakukan sebelumnya. Kecermatan pada tahap ini akan menghasilkan eksperimen yang memberikan informasi positif atau negatif. Informasi positif terjadi apabila hasil eksperimen memberikan indikasi tentang faktor dan level yang mengarah pada peningkatan performansi produk. Informasi negatif terjadi apabila hasil eksperimen gagal memberikan indikasi tentang faktor-faktor yang mempengaruhi respon. Tahap ini terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut:

a. Perumusan masalah

Rumusan masalah harus didefinisikan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.

b. Penentuan tujuan eksperimen

Tujuan yang melandasi eksperimen harus dapat menjawab masalah yang telah dirumuskan.

c. Penentuan respon

Respon memiliki nilai yang tergantung pada faktor-faktor lain. Dalam desain eksperimen Taguchi, respon adalah karakteristik kualitas yang terdiri dari tiga kategori, yaitu:

- 1) Karakteristik yang dapat diukur, yaitu semua hasil akhir yang dapat diukur dengan skala kontinu. Contoh dari karakteristik ini adalah temperatur, berat, tekanan, dan lain-lain.
- 2) Karakteristik atribut, yaitu semua hasil akhir yang tidak dapat diukur dengan skala kontinu, tetapi dapat diklasifikasikan secara berkelompok. Contoh dari karakteristik ini adalah retak, jelek, baik, dan lain-lain.
- 3) Karakteristik dinamik, yaitu fungsi representasi dari proses yang diamati. Proses yang diamati digambarkan sebagai sinyal dan keluaran digambarkan sebagai hasil dari sinyal. Contoh karakteristik ini adalah sistem

transmisi otomatis dengan putaran mesin sebagai masukan dan perubahan getaran sebagai keluaran.

d. Pengidentifikasian faktor

Faktor adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini akan dipilih faktor-faktor yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua faktor yang diperkirakan mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.

e. Pemisahan faktor kontrol dan faktor gangguan

Faktor-faktor yang diamati dapat dibagi menjadi faktor kontrol dan faktor gangguan. Dalam desain eksperimen Taguchi, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Faktor kontrol adalah faktor yang nilainya dapat dikendalikan sedangkan faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak dapat dikendalikan.

f. Penentuan jumlah dan nilai level faktor

Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.

g. Perhitungan derajat kebebasan

Derajat kebebasan adalah sebuah konsep untuk mendeskripsikan seberapa besar eksperimen harus dilakukan dan seberapa banyak informasi yang dapat diberikan oleh eksperimen tersebut. Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan jumlah eksperimen yang akan dilakukan untuk menyelidiki faktor yang diamati. Derajat kebebasan dari matriks ortogonal (v_{mo}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{mo} = \text{jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.28)$$

Derajat kebebasan dari faktor dan level (v_{fl}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_{fl} = \text{jumlah level faktor} - 1 \quad (2.29)$$

h. Pemilihan matriks ortogonal

Pemilihan matriks ortogonal yang sesuai ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah faktor dan jumlah level faktor. Matriks ortogonal memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah faktor dengan jumlah eksperimen yang minimum. Suatu matriks ortogonal dilambangkan dalam bentuk:

$$L_a (b^c) \quad (2.30)$$

Dengan:

L = rancangan bujur sangkar latin

a = banyaknya eksperimen

b = banyaknya level faktor

c = banyaknya faktor

Matriks ortogonal ditentukan dengan berpedoman pada grafik linier standar dari matriks ortogonal yang dipilih.

2. Tahap pelaksanaan

Tahap pelaksanaan meliputi penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen (Ross, 2008).

a. Jumlah replikasi

Replikasi adalah pengulangan kembali perlakuan yang sama pada kondisi yang sama dalam sebuah percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi. Replikasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- 1) Menambah ketelitian data hasil eksperimen.
- 2) Mengurangi tingkat kesalahan pada eksperimen.

- 3) Memperoleh harga taksiran dari kesalahan sebuah eksperimen sehingga memungkinkan diadakan uji signifikansi hasil eksperimen.

b. Randomisasi

Dalam sebuah eksperimen, ada pengaruh faktor-faktor lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan, seperti: kelelahan operator, fluktuasi daya mesin, dan lain-lain. Pengaruh itu dapat diperkecil dengan menyebarkan faktor-faktor tersebut melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan. Secara umum, randomisasi dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- 1) Menyebarkan pengaruh dari faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen.
- 2) Memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama.
- 3) Mendapatkan hasil eksperimen yang bebas satu sama lain.

Jika replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

3. Tahap analisis

Pada tahap ini, pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Tahap ini meliputi pengumpulan data, pengaturan data, perhitungan serta penyajian data dalam suatu tampilan tertentu yang sesuai dengan desain yang dipilih. Selain itu, perhitungan dan pengujian data statistik dilakukan pada data hasil eksperimen.

a. Analisis variansi (ANAVA)

Analisis variansi adalah teknik pengambilan keputusan yang digunakan untuk mendeteksi adanya perbedaan performa rata-rata pada kumpulan data yang telah disusun dalam desain secara statistik (Ross, 2008). Analisis ini dilakukan dengan

menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi faktor. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua faktor atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANAVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (db), jumlah kuadrat (*sum of square*, SS), kuadrat tengah (*mean of square*, MS) dan F_{hitung} seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Tabel Analisis Variansi

Sumber variasi	Db	SS	MS	F_{hitung}
Faktor A	v_A	SS_A	MS_A	F_A
Faktor B	v_B	SS_B	MS_B	F_B
Error	v_{error}	SS_{error}	MS_{error}	
Total	v_T	SST		

Dengan:

$$\begin{aligned} v_T &= \text{Derajat bebas total.} \\ &= N-1 \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} v_A &= \text{Derajat bebas faktor A.} \\ &= k_A - 1 \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} v_B &= \text{Derajat bebas faktor B.} \\ &= k_B - 1 \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} v_{error} &= \text{Derajat bebas error.} \\ &= v_T - v_A - v_B - v_{AB} \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= \text{Jumlah kuadrat total.} \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} SS_A &= \text{Jumlah kuadrat faktor A.} \\ &= n_{A_i} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} SS_B &= \text{Jumlah kuadrat faktor B.} \\ &= n_{A_i} \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} SS_E &= \text{Jumlah kuadrat error.} \\ &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} MS_A &= \text{Kuadrat tengah faktor A.} \\ &= \frac{SS_A}{v_A} \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} MS_B &= \text{Kuadrat tengah faktor B.} \\ &= \frac{SS_B}{v_B} \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} MS_E &= \text{Kuadrat tengah error.} \\ &= \frac{SS_E}{v_E} \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} n_{A_i} &= \text{Jumlah total pengamatan faktor A} \\ n_{B_j} &= \text{Jumlah total pengamatan faktor B} \end{aligned}$$

b. Uji distribusi F

Uji distribusi F digunakan dengan tujuan untuk menunjukkan bukti adanya perbedaan pengaruh masing-masing faktor dalam eksperimen (Soejanto, 2009). Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dan variansi *error*. Variansi *error* adalah variansi setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk faktor yang ditentukan secara *fixed* adalah (Montgomery, 2009):

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

$$H_1 : \text{sedikitnya ada satu pasangan } \mu \text{ yang tidak sama}$$

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan pada

perlakuan yang berbeda, sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon tersebut. Selain itu, karena respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.42)$$

Dengan:

- Y_{ijk} = variabel respon
- μ = rata-rata respon keseluruhan
- τ_i = efek utama dari variabel A
- β_j = efek utama dari variabel B
- ε_{ijk} = residual *error* dengan asumsi IIDN($0, \sigma^2$)

Maka hipotesis yang juga dapat digunakan dalam pengujian adalah

- Untuk taraf faktor A $\rightarrow H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$
 $H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \tau \text{ tidak sama dengan } 0$
- Untuk taraf faktor B $\rightarrow H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$
 $H_1 : \text{paling sedikit ada satu } \beta \text{ tidak sama dengan } 0$

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan tidak adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan adanya pengaruh faktor A dan faktor B terhadap respon. Kegagalan menolak atau penolakan H_0 didasarkan pada nilai F_{hitung} yang dirumuskan (Montgomery, 2009):

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.43)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.44)$$

Kegagalan menolak H_0 pada masing-masing kasus dilakukan jika perbandingan antara F_{hitung} dan F_{tabel} sebagai berikut:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \quad \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_A, v_E} \quad (2.45)$$

$$\text{Untuk taraf faktor B} \quad \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_B, v_E} \quad (2.46)$$

Bila menggunakan perangkat komputasi statistik, kegagalan menolak H_0 dilakukan jika $p\text{-value}$ lebih besar daripada α (taraf signifikansi). Kegagalan menolak H_0 juga dilakukan apabila nilai F_{hitung} lebih besar dari dua (Park, 1996).

c. Rasio S/N

Rasio S/N (*Signal to Noise*) digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas, yaitu (Lin dan Lin, 2002):

1. Semakin kecil semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non-negatif sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (2.47)$$

2. Tertuju pada nilai tertentu

Adalah karakteristik kualitas dengan nilai target tidak nol dan terbatas sehingga nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk

karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n}}{n} \right] \quad (2.48)$$

3. Semakin besar semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non-negatif sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

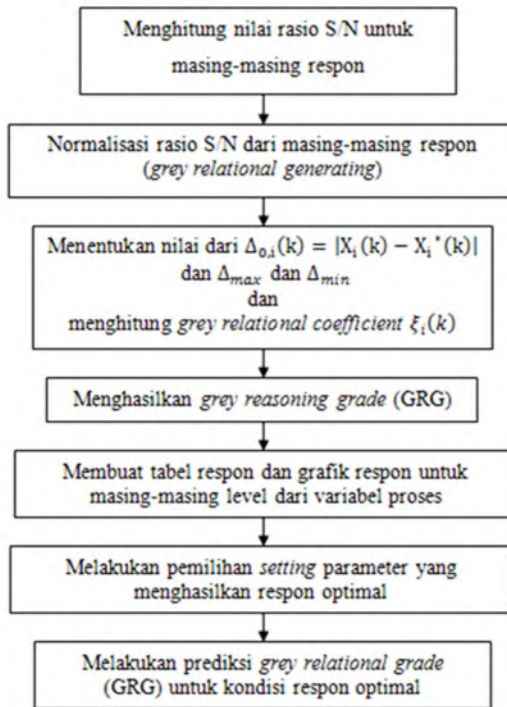
$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n}}{n} \right] \quad (2.49)$$

2.2.10 Metode Taguchi-*Grey Relational Analysis* (GRA)

Dalam metode Taguchi, optimasi hanya dapat dilakukan untuk satu respon saja. Untuk melakukan optimasi beberapa respon secara serentak digunakan gabungan dari metode Taguchi dan *grey relational analysis* (GRA).

Metode GRA diawali dengan teori *grey system* yang dibuat oleh Dr. Julong Deng pada tahun 1982, yang merupakan dasar dari suatu metode baru yang difokuskan pada studi tentang permasalahan yang memiliki data dan informasi yang minimum. Metode GRA digunakan untuk menciptakan model hubungan dan melakukan analisis hubungan antar respon dan parameter, serta sebagai dasar dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan (Deng, 1989). GRA merupakan salah satu metode yang dibangun berdasarkan teori *grey*. Pada dasarnya GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon.

Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan metode GRA dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Langkah-langkah proses optimasi

Rincian dari langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menghitung rasio S/N untuk masing-masing respon.
Perhitungan rasio S/N dilakukan berdasarkan karakteristik dari masing-masing respon sesuai dengan persamaan 2.47 hingga persamaan 2.49.
2. Normalisasi data untuk masing-masing respon
Tabel 2.5 menunjukkan penempatan nilai respon untuk proses normalisasi.

Tabel 2.5 Penempatan Rasio S/N

	Rasio S/N 1	Rasio S/N 2		Rasio S/N k
Kombinasi 1	$X_1(1)$	$X_1(2)$...	$X_1(k)$
Kombinasi 2	$X_2(1)$	$X_2(2)$...	$X_2(k)$
...
Kombinasi i	$X_i(1)$	$X_i(2)$...	$X_i(k)$

Cara yang digunakan untuk proses normalisasi tergantung dari karakteristik respon yang meliputi lebih besar lebih baik (*larger is better*), lebih kecil lebih baik (*smaller is better*) dan tertuju pada nilai tertentu (*nominal is best*). Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “lebih besar lebih baik” adalah (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.50)$$

Proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “lebih kecil lebih baik” menggunakan persamaan sebagai berikut (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.51)$$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik “tertuju pada nilai tertentu” adalah (Huang dan Liao, 2013):

$$X_i^*(k) = \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \quad (2.52)$$

Dengan:

$$\max_{\forall k} X_i(k) = \text{nilai terbesar dari } X_i(k)$$

$$\min_{\forall k} X_i(k) = \text{nilai terkecil dari } X_i(k)$$

$$X_{ob}(k) = \text{nilai target dari } X_i(k)$$

Pada penelitian ini, normalisasi dilakukan pada rasio S/N dimana rasio S/N memiliki karakteristik kualitas semakin besar semakin baik.

3. Menentukan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$

Deviation sequence $\Delta_{0,i}(k)$ adalah selisih secara absolut dari nilai terbesar hasil normalisasi, yaitu selisih antara 1 dengan data yang telah dinormalisasi. Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_i(k) - X_i^*(k)| \quad (2.53)$$

4. Menentukan *grey relational coefficient* $\xi_i(k)$

Grey relational coefficient menunjukkan hubungan antara kondisi yang ideal (terbaik) dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. *Grey relational coefficient* akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah (Datta dan Mahapatra, 2010):

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (2.54)$$

Dengan:

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k \Delta_{0,i}(k)$$

$$\Delta_{max} = \max_i \max_k \Delta_{0,i}(k)$$

$\zeta = \text{distinguishing coefficient.}$

Pada umumnya nilai *distinguishing coefficient* diatur berdasarkan kebutuhan dan besarnya antara 0 dan 1. Nilai *distinguishing coefficient* yang digunakan pada umumnya adalah 0,5 (Tosun dkk. 2006). Nilai *grey relational coefficient* yang tinggi menunjukkan bahwa hasil eksperimen memiliki hubungan yang dekat dengan nilai normalisasi yang terbaik pada respon tersebut.

5. Menentukan Kombinasi Parameter untuk Respon Optimal
Semakin besar nilai GRG, semakin baik pula respon dari proses pada kombinasi parameter tersebut. Penentuan kombinasi parameter terbaik diawali dengan membuat tabel respon dari GRG seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Tabel Respon *Grey Reasoning Grade* (GRG)

	Level 1	Level 2	Level j
Kombinasi 1	Y_{11}	-	Y_{1j}
Kombinasi 2	Y_{21}	-	Y_{2j}
-			
Kombinasi i	Y_{i1}	-	Y_{ij}
Max-Min	Q_1		Q_j

Y_{ij} adalah rata-rata nilai GRG yang dikelompokkan berdasarkan kombinasi i dan level j.

Grafik respon dibuat berdasarkan tabel respon untuk memudahkan pemilihan level dari parameter yang menghasilkan respon yang optimal.

6. Memprediksi nilai GRG hasil optimalisasi
Nilai prediksi GRG berdasarkan kombinasi level parameter untuk menghasilkan respon yang optimal dapat dirumuskan sebagai berikut (Lin dan Lin, 2002):

$$\hat{Y} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{Y}_i - \gamma_m) \quad (2.59)$$

Dengan:

- γ_m = nilai rata-rata dari keseluruhan GRG
 $\bar{\gamma}_i$ = rata-rata GRG pada level optimal
 o = jumlah parameter yang mempengaruhi respon secara signifikan

2.2.11 Interpretasi Hasil Eksperimen

Interpretasi yang dilakukan pada hasil eksperimen dengan menggunakan desain metode Taguchi, yaitu:

1. Persen kontribusi

Persen kontribusi digunakan untuk mengindikasikan kekuatan relatif sebuah faktor dan/atau interaksi untuk mengurangi variasi yang terjadi. Perhitungan persen kontribusi pada dasarnya adalah fungsi dari jumlah kuadrat dari masing-masing faktor yang signifikan. Komponen-komponen yang dihitung dalam persen kontribusi adalah faktor, interaksi faktor, dan *error*. Jika persen kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka berarti tidak ada faktor yang berpengaruh terabaikan. Tetapi jika persen kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka ada faktor yang berpengaruh terabaikan, sehingga *error* yang terjadi terlalu besar. Persen kontribusi suatu faktor dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Ross, 2008):

$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \% \quad (2.60)$$

Dengan:

$$SS'_A = SS_A - v_A \cdot MS_E \quad (2.61)$$

Dengan:

- SS_A = jumlah kuadrat dari faktor yang dihitung persen kontribusinya
 SS_T = jumlah kuadrat total
 v_A = derajat kebebasan dari faktor yang dihitung persen kontribusinya

MS_E = rata-rata kuadrat dari faktor *error*

2. Interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% untuk kondisi optimum (Ross, 2008):

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1,v_g} MS_E}{n_{eff}}} \quad (2.62)$$

$$\hat{\mu}_{prediksi} - CI_1 \leq \hat{\mu}_{prediksi} \leq \hat{\mu}_{prediksi} + CI_1 \quad (2.63)$$

Dengan:

$\hat{\mu}_{prediksi}$ = dugaan rata-rata GRG pada kombinasi optimal

n_{eff} = banyaknya pengamatan efektif

$$n_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan faktor-faktor untuk menduga rata-rata}} \quad (2.64)$$

2.2.12 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi merupakan langkah terakhir yang harus dilakukan pada penelitian tentang optimasi proses. Eksperimen ini dilaksanakan dengan melakukan percobaan yang menggunakan kombinasi level faktor-faktor hasil optimasi. Tujuan dari eksperimen konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahap analisa.

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk mencocokkan hasil prediksi dengan hasil respon secara aktual. Selain itu, eksperimen konfirmasi dilakukan untuk membandingkan respon pada kondisi awal dengan respon setelah dilakukan proses optimalisasi. Langkah-langkah dalam eksperimen konfirmasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

- a. Menentukan kombinasi faktor dan level untuk menghasilkan respon optimum.
- b. Melakukan pengujian berdasarkan kombinasi untuk respon optimum.
- c. Membandingkan rata-rata hasil percobaan konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi.

- d. Membandingkan respon pada pada kondisi awal dan kondisi optimum yang telah dilakukan eksperimen konfirmasinya.

Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil apabila:

- a. Rata-rata hasil eksperimen konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi.
- b. Interval keyakinan dari rata-rata respon eksperimen konfirmasi berhimpit atau beririsan dengan interval keyakinan $(1-\alpha)$ 100% dari rata-rata respon hasil optimum. Interval keyakinan eksperimen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Ross, 2008).

$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;vE} \cdot MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \quad (2.65)$$

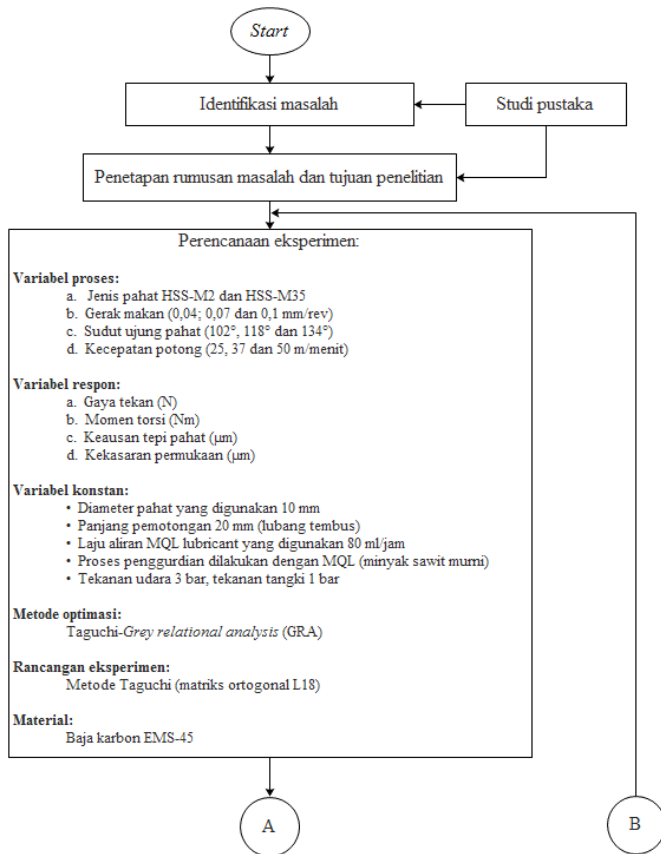
Dengan:

r = jumlah pengulangan dalam eksperimen konfirmasi

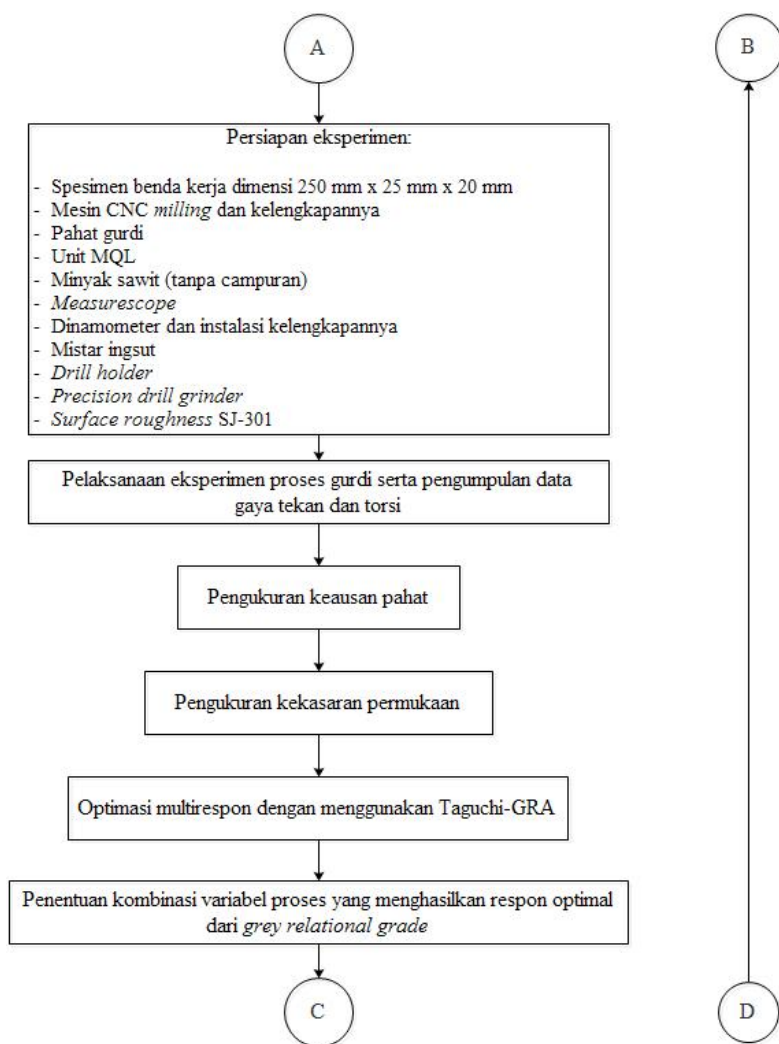
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

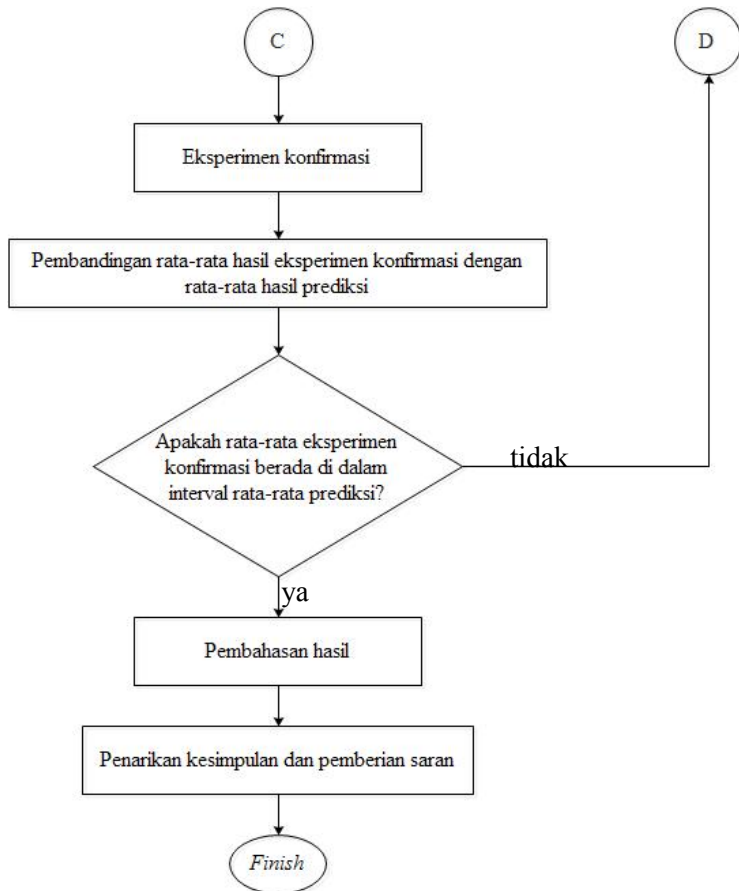
Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini disajikan dalam diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian (lanjutan)



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian (lanjutan)

3.2 Variabel Penelitian

Untuk mendapatkan data eksperimen pada proses gurdi dengan menggunakan MQL pada material baja karbon, maka variabel-variabel yang akan digunakan untuk penelitian adalah sebagai berikut:

1. Variabel Proses

Variabel proses merupakan variabel yang nilainya dapat dikendalikan dan dapat ditentukan berdasarkan pertimbangan tertentu dalam penelitian yang mengarah pada tujuan dari penelitian. Variabel proses yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. Jenis pahat HSS-M2 dan HSS-M35
- b. Sudut ujung pahat (102° , 118° dan 134°)
- c. Gerak makan (0,04; 0,07 dan 0,1 mm/rev)
- d. Kecepatan potong (25, 37 dan 50 m/menit)

2. Variabel respon

Variabel respon merupakan variabel yang nilainya tidak dapat ditentukan diawal dan akan dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan. Nilai variabel ini dapat diketahui setelah melakukan eksperimen. Variabel respon yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Gaya tekan (N)
- b. Momen torsi (Nm)
- c. Kekasaran permukaan (μm)
- d. Keausan tepi pahat (μm)

3. Variabel konstan

Variabel konstan merupakan variabel proses yang tidak diteliti. Variabel ini dijaga agar tidak berubah selama proses eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil eksperimen. Terdapat lima variabel konstan yang digunakan pada penelitian ini yaitu, diameter pahat, panjang langkah pemotongan, laju aliran MQL, *cutting fluid* yang digunakan dan tekanan udara untuk mengalirkan *cutting fluid*.

3.3 Karakteristik Respon Optimal

Variabel respon yang meliputi gaya tekan (N), momen torsi (Nm), keausan pahat (μm) dan kekasaran permukaan (μm) memiliki karakteristik respon optimal. Karakteristik respon optimal yang diharapkan adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is*

better), yang berarti nilai dari gaya tekan (N), momen torsi (Nm), keausan pahat (μm) dan kekasaran permukaan (μm) yang minimum adalah yang paling diinginkan.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data respon yang nilainya akan dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan. Penelitian dilakukan di Laboratorium Pemesinan Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.

3.4.1 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan adalah:

1. Mesin CNC *milling* EMCO VMC-200

Mesin CNC yang digunakan adalah jenis mesin CNC *milling* dengan merek EMCO VMC-200. Mesin ini memiliki putaran mesin 0-4500 rpm dan laju gerak makan 0-4000 mm/menit. Mesin ini memiliki 3 axis dimana masing-masing panjang axisnya adalah sumbu X sebesar 420 mm, sumbu Y sebesar 330 mm dan sumbu Z sebesar 240 mm. Mesin ini ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Mesin CNC *milling* EMCO VMC-200

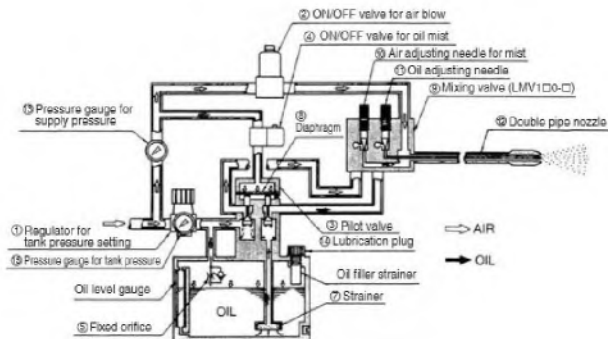
2. Unit MQL

Unit MQL yang digunakan adalah SMC *mist spray unit* LMU 100-15, digunakan sebagai penyalur *cutting fluid* dalam bentuk aerosol. Memiliki kapasitas tangki sebesar 3000 cm³ dan *inlet pressure* hingga 10 bar. Unit MQL ditunjukkan pada

gambar 3.3. dan skema sistem kerja unit MQL ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Unit MQL



Gambar 3.4 Skema sistem kerja unit MQL

3. Dinamometer

Dinamometer yang digunakan adalah dinamometer merek KISTLER tipe 9272. Dinamometer ini bertugas untuk pengukuran gaya potong dan torsi (F_z , F_y , F_x dan M_z) pahat saat proses penggurdian yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Dinamometer tipe 9272

4. Akusisi data tipe 5697A

Akusisi data digunakan sebagai penghubung dari *charge amplifier* dan dinamometer ke *notebook*, sehingga data dapat ditampilkan pada *notebook*. Akusisi data ditunjukkan pada Gambar 3.6. dan memiliki dimensi 208x70x249 mm serta massa seberat 2,15 kg.



Gambar 3.6. Akusisi data tipe 5697A

5. *Charge amplifier* type 5070A

Charge amplifier digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran gaya potong dan torsi yang terhubung dengan dinamometer. *Charge amplifier* ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Charge amplifier* type 5070A

6. Compaq Presario CQ35-336TX

Notebook Compaq Presario digunakan untuk menampilkan dan mengolah data hasil percobaan. *Notebook* yang sudah memiliki perangkat lunak DynoWare dari KISTLER yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Compaq presario CQ35-336TX

7. *Measurescope*

Keausan pahat didefinisikan sebagai panjang keausan tepi pahat dengan panjang tertentu. Panjang keausan tepi pahat (V_B) pada penelitian ini diukur dengan menggunakan Nikon *measurescope* yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. Alat ukur ini memiliki kecermatan $1\ \mu\text{m}$. Panjang maksimum yang dapat diukur dengan menggunakan alat ini adalah 5 mm.



Gambar 3.9 Nikon *measurescope*

8. *Precision drill grinder*

Precision drill grinder digunakan untuk mengasah dan membentuk sudut ujung pahat gundi. *Precision drill grinder* ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Precision drill grinder*

9. Mitutoyo *surftest* SJ-310

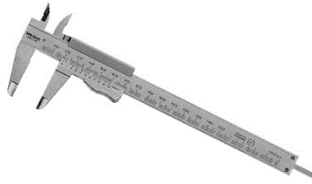
Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan pada lubang hasil proses penggurdian dengan menggunakan Mitutoyo *surftest* SJ-310. Gambar 3.11 menunjukkan peralatan pengukuran kekasaran permukaan yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3.11 Mitutoyo *surftest* SJ-310

10. Mistar insut

Mistar insut digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji yang memiliki kecermatan 0,02 mm. Mistar insut ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Mistar insut

11. *Drill holder*

Pengukuran keausan tepi pahat memerlukan *drill holder* untuk mencekam pahat gundi dan memposisikan bidang tepi mata potong sejajar dengan meja *measurescope*. *Drill holder* ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Drill holder

3.4.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan adalah:

1. Pahat gundi

Terdapat dua jenis pahat gundi yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

a. *High speed steel M2 (HSS-M2)*

Pahat gundi ini termasuk ke dalam jenis *twist drill* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merek dagang	= SUN FLOWER
Kodifikasi	= DIN 338
Jumlah alur/ <i>flute</i>	= 2 buah
Sudut puntir	= 28°
Diameter	= 10 mm
Kekerasan	= 845 VHN

b. *High speed steel M35 (HSS-M35 Cobalt)*

Pahat gundi ini termasuk ke dalam jenis *twist drill* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merek dagang	= SUN FLOWER
Kodifikasi	= DIN 338
Jumlah alur/ <i>flute</i>	= 2 buah
Sudut puntir	= 29°
Diameter	= 10 mm
Kekerasan	= 900 VHN

Kedua jenis pahat tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.14. Spesifikasi pahat gundi dapat dilihat pada *lampiran 11*.



a.



b.

Gambar 3.14 a) Pahat HSS-M2 b) Pahat HSS-M35 *Cobalt*

2. Benda Kerja

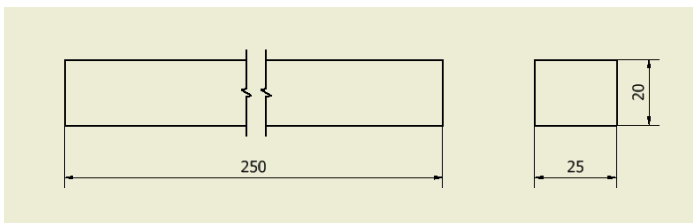
Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja EMS-45 dengan spesifikasi dan komposisi kimia sebagai berikut (Syamsul dkk. 2013):

Dimensi	= 250 x 25 x 20 mm.
Kekerasan	= 29 HRC
Kekuatan tarik	= 96 Kg/mm ²
C	= 0,47%
Si	= 0,28%
Mn	= 0,77%
P	= 0,01%
S	= 0,07%
Cr	= 0,03%
Ni	= 0,01%
Cu	= 0,02%

Baja EMS-45 ditunjukkan pada Gambar 3.15. Dimensi benda kerja ditunjukkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.15 Benda kerja EMS-45



Gambar 3.16 Dimensi benda kerja

3. Minyak sawit

Minyak sawit yang digunakan pada penelitian ini adalah minyak sawit murni tanpa campuran dengan spesifikasi sebagai berikut:

Viskositas kinematis 40°C = 43,66 Cst

Viskositas kinematis 100°C = 8,77 Cst

Flash point = 228°C

Spesifikasi minyak sawit dapat dilihat pada *lampiran 14*.

3.5 Pemilihan Matriks Ortogonal

Matriks ortogonal yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan rancangan eksperimen metode Taguchi. Derajat kebebasan pada matriks ortogonal harus bernilai sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan variabel proses dan level yang telah ditetapkan. Berdasarkan banyaknya variabel proses dan jumlah level yang digunakan pada penelitian, dilakukan perhitungan derajat kebebasan untuk menentukan matriks ortogonal yang digunakan. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Total derajat kebebasan variabel proses dan levelnya

No	Variabel proses	Jumlah level (k)	$v_f (k-1)$
1	Jenis pahat	2	1
2	Kecepatan potong (m/menit)	3	2
3	Gerak makan (mm/menit)	3	2
4	Sudut ujung pahat °(derajat)	3	2
Total derajat kebebasan			7

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 3.1 didapatkan 7 derajat kebebasan untuk rancangan eksperimen ini. Terdapat tiga variabel proses yang memiliki tiga level dan satu variabel proses yang memiliki dua level seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1,

sehingga matriks ortogonal yang digunakan adalah L_{18} ($2^1 \times 3^3$). Rancangan percobaan L_{18} memiliki 4 kolom dan 18 baris. Rancangan percobaan untuk penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rancangan percobaan Taguchi

Kombinasi ke-	Variabel proses			
	Jenis pahat	Sudut ujung pahat	Gerak makan	Kecepatan potong
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Tabel 3.3 Variabel proses dan levelnya

Variabel proses	Unit	Level		
		1	2	3
Jenis pahat	-	HSS-M2	HSS-M35	-
Kecepatan potong	m/menit	25	37	50
Gerak makan	mm/rev	0,04	0,07	0,1
Sudut ujung pahat	°(derajat)	102	118	134

Eksperimen dilakukan secara acak dengan kombinasi variabel proses mengacu pada rancangan percobaan yang sesuai dengan matriks ortogonal pada Tabel 3.2. Pengacakan ini dilakukan dengan menggunakan fasilitas randomisasi bilangan melalui bantuan perangkat lunak Minitab 16. Masing-masing kombinasi variabel proses akan dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk mengatasi faktor gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses penggurdian berlangsung. Bila data hasil eksperimen dikumpulkan sesuai dengan kombinasi seting variabel yang sejenis, maka susunan data yang akan diperoleh ditunjukkan seperti pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Tampilan data hasil eksperimen

Kombinasi ke-	F_z (N)		M_t (Nm)		Keausan pahat (μm)		Kekasaran permukaan (μm)	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
1	Y_{11}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{14}
2	Y_{21}	Y_{21}	Y_{22}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{23}	Y_{24}	Y_{24}
3	Y_{31}	Y_{31}	Y_{32}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{34}
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
18	Y_{181}	Y_{181}	Y_{182}	Y_{182}	Y_{183}	Y_{183}	Y_{184}	Y_{184}

Keterangan:

R1: replikasi 1

R2: replikasi 2

3.6 Prosedur Percobaan

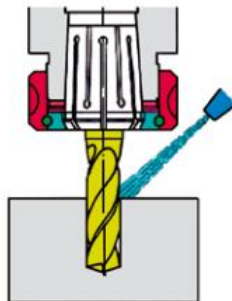
Langkah-langkah percobaan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Memberi tanda pada spesimen sebagai titik pusat lubang saat proses penggurdian berlangsung.
2. Memasang dinamometer pada bantalan mesin CNC *milling* dengan menggunakan mur dan baut.
3. Memasang spesimen penelitian pada dinamometer seperti ditunjukkan pada Gambar 3.20.
4. Menghubungkan dinamometer dengan *charge amplifier* KISTLER *type* 5070A menggunakan kabel koneksi *type* KISTLER 16775A.
5. Menghubungkan *charge amplifier* KISTLER *type* 5070A dengan DAQ KISTLER *type* 5697A menggunakan kabel koneksi 1700A111A2 dan 1200A27.
6. Menghubungkan sistem DAQ KISTLER *type* 5697A dengan *notebook* menggunakan kabel USB.
7. Menghubungkan *charge amplifier* KISTLER *type* 5070A dan sistem DAQ KISTLER *type* 5697A ke sumber listrik dengan kabel power listrik. Gambar 3.21 menunjukkan pemasangan instrumentasi dinamometer.
8. Melakukan pengaturan variabel proses gurdi yang meliputi pengaturan kecepatan potong dan gerak makan pada mesin CNC *tapping center*.
9. Memasang pahat *twist drill* pada pencekam pahat sesuai dengan kombinasi variabel proses.
10. Memasang rangkaian unit MQL seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.17.
11. Mengatur penempatan posisi *nozzle* seperti ilustrasi pada Gambar 3.18. Pemasangan *nozzle* ditunjukkan pada Gambar 3.19.
12. Menyalakan mesin CNC *milling*.
13. Menyalakan unit MQL.
14. Melaksanakan proses penggurdian berdasarkan kombinasi yang telah ditentukan.

15. Melakukan proses pengambilan data berupa gaya tekan dan momen torsi selama proses penggurdian berlangsung.
16. Menyimpan data grafik yang didapat dari dinamometer untuk kemudian diolah.
17. Melakukan prosedur percobaan diatas pada 18 kombinasi percobaan secara acak beserta replikasinya.
18. Melepas spesimen penelitian dari dinamometer.
19. Mengukur keausan pahat menggunakan measurescope.
20. Mengukur kekasaran permukaan lubang hasil penggurdian dengan menggunakan peralatan Mitutuyo *surftest* SJ 310.



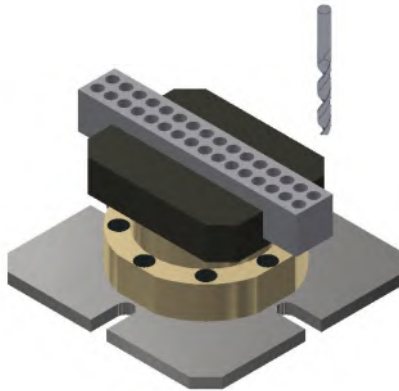
Gambar 3.17 Pemasangan unit MQL



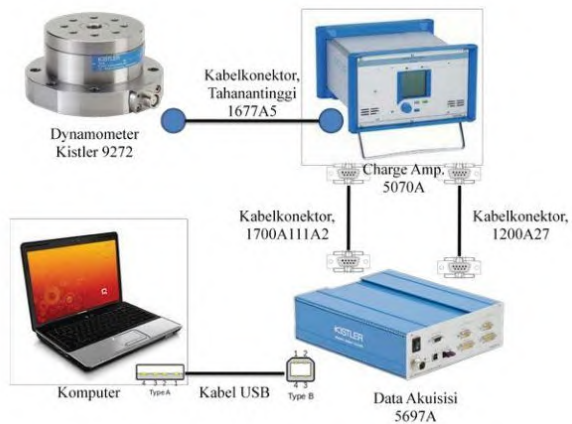
Gambar 3.18 Ilustrasi penempatan posisi *nozzle*



Gambar 3.19 Penempatan posisi *nozzle*



Gambar 3.20 Pemasangan benda kerja pada dinamometer



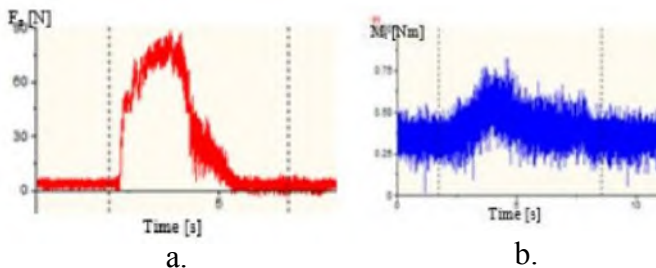
Gambar 3.21 Pemasangan instrumentasi dinamometer

3.7 Pengukuran dan Pengambilan Data

Terdapat empat jenis respon yang akan diamati dan diukur pada penelitian ini. Respon yang akan diamati dan diukur adalah gaya tekan, momen torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan. Pengukuran dan pengambilan data untuk masing-masing respon tersebut dijelaskan sebagai berikut:

3.7.1 Pengukuran dan Pengambilan Data Gaya Tekan dan Momen Torsi

Pengambilan data gaya tekan dan momen torsi dilakukan dengan menggunakan dinamometer yang telah terpasang instalasinya pada mesin CNC *tapping center*. Pengambilan data gaya tekan dan delaminasi dilakukan saat proses penggurdian berlangsung. Data berupa grafik yang didapat dari perangkat lunak *dynoware* ini kemudian disimpan dan diolah. Perangkat lunak *dynoware* dilengkapi dengan fasilitas *measure* untuk mengukur nilai rata-rata dari grafik yang diperoleh. Grafik gaya tekan dan momen torsi yang diperoleh dari percobaan kemudian diukur nilai rata-ratanya, kemudian nilai rata-rata ini akan dimasukkan pada tabel data penelitian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3. Gambar 3.21 menunjukkan contoh grafik gaya tekan dan momen torsi yang diperoleh dari dinamometer dengan bantuan perangkat lunak *dynoware*.

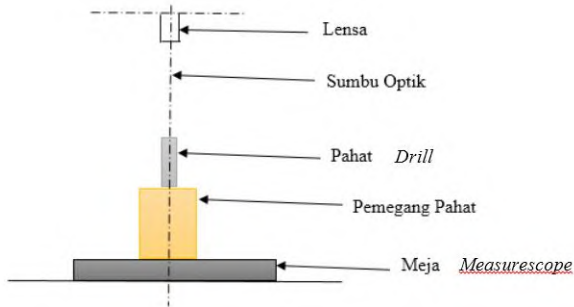


Gambar 3.22 a) Grafik gaya tekan b) Grafik momen torsi

3.7.2 Pengukuran dan Pengambilan Data Keausan Pahat

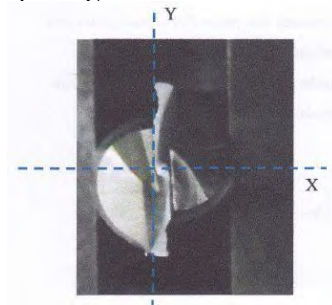
Langkah-langkah dari pengukuran keausan pahat adalah sebagai berikut:

1. Letakkan pahat gurdi di atas pemegang pahat sejajar dengan sumbu optik *measurescope* seperti terlihat pada Gambar 3.22.



Gambar 3.23 Posisi pengukuran keausan pahat gurdi

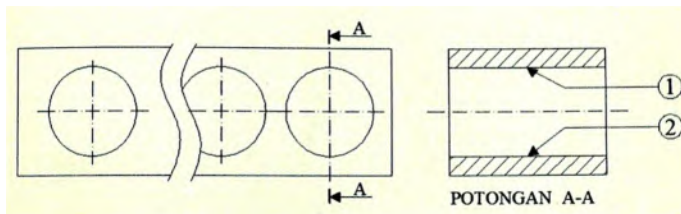
2. Mengukur keausan pahat gurdi pada mata potong yang telah digunakan. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan sisi mata potong sebelum aus sejajar dan tepat berada pada salah satu sumbu referensi (dalam pengukuran ini dipergunakan sumbu Y) seperti terlihat pada Gambar 3.23. Selanjutnya, posisi pahat pada sumbu Y sebelum aus digeser sampai bekas keausan pada pahat sejajar dan berimpit di sumbu Y. Nilai keausan pahat diperoleh dengan menghitung rata-rata dari nilai VB_1 dan VB_2 pada setiap mata potong.



Gambar 3.24 Skema proses pengukuran keausan pahat gurdi

3.7.3 Pengukuran dan Pengambilan Data Kekasaran Permukaan

Pengambilan data kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan alat ukur kekasaran permukaan Mitutoyo *surf test* SJ-310. Lubang hasil penggurdian diukur nilai kekasaran permukaannya di dua tempat yang berbeda kemudian hasilnya dirata-ratakan. Nilai kekasaran yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai kekasaran aritmetik (R_a) yang dapat langsung terbaca pada peralatan instalasi pengukuran. Daerah pengukuran kekasaran pada benda kerja ditunjukkan pada Gambar 3.24.



Gambar 3.25 Daerah pengukuran kekasaran permukaan

3.8 Pengerjaan Optimasi Multirespon

Optimasi multi respon proses gurdi menggunakan metode Taguchi-GRA dilakukan untuk memperoleh kombinasi yang paling optimum dari variabel proses untuk meminimalkan respon. Tahapan berikutnya adalah perbandingan antara hasil optimasi dengan hasil eksperimen dari kombinasi yang lain sesuai dengan rancangan matriks ortogonal.

3.9 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan apabila hasil optimasi lebih baik dibandingkan dengan kombinasi yang lain pada rancangan matriks ortogonal. Setelah itu dilakukan. Perbandingan rata-rata hasil eksperimen konfirmasi dengan rata-rata hasil prediksi. Nilai rata-rata hasil eksperimen konfirmasi harus berada pada interval rata-rata prediksi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN ANALISA DATA

4.1 Data Hasil Pengukuran

Eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan variabel-variabel proses gurdi pada material baja EMS-45 dengan menggunakan *minimum quantity lubrication* (MQL), yang diduga memiliki pengaruh terhadap gaya tekan (F_z), torsi (T), keausan tepi pahat (VB) dan kekasaran permukaan (SR). Variabel-variabel proses tersebut adalah jenis pahat (JP), sudut ujung pahat (PA), gerak makan (f) dan kecepatan potong (V_c).

Pengambilan data yang dilakukan pertama kali adalah pengambilan data berupa gaya tekan dan torsi yang diukur dengan menggunakan dinamometer KISTLER tipe 9272. Selanjutnya dilakukan pengukuran keausan tepi pahat yang diukur dengan menggunakan Nikon *measurescope*. Data terakhir yang diambil adalah data kekasaran permukaan diukur dengan menggunakan alat ukur kekasaran permukaan Mitutoyo *surf test* SJ-310. Pengambilan data gaya tekan dan torsi dilakukan dengan replikasi sebanyak dua kali untuk setiap kombinasi variabel proses. Pengukuran keausan tepi pahat dilakukan pada kedua mata potong pahat yang dibagi menjadi enam titik pengukuran, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan di dua tempat berbeda pada satu lubang, kemudian dihitung rata-ratanya. Hasil eksperimen berupa gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan pahat ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen

Kombinasi ke-	Gaya tekan (N)	Torsi (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Keausan tepi pahat (μm)
1	712,15	3,315	4,36	41,1
2	1228	3,681	3,38	46,5
3	1464	4,818	4,25	59,8
4	1012,5	2,438	3,97	39,0
5	1099	3,347	2,93	42,3
6	1304	4,338	3,68	49,6
7	1123	1,812	2,48	36,6
8	1462,5	2,810	3,58	39,3
9	1870	3,666	4,51	25,1
10	575,8	2,760	4,00	61,5
11	864,05	3,326	4,60	35,3
12	1299	4,565	4,76	39,3
13	897	2,300	4,04	46,1
14	1333	3,054	3,61	50,1
15	1404,5	4,052	6,01	37,7
16	999,5	1,676	3,24	38,4
17	1431	2,606	4,34	27,3
18	1607	3,591	4,24	27,4

Sumber: Hasil pengukuran

Berdasarkan Tabel 4.1, gaya tekan terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 9 dan besarnya adalah 1870 N, sedangkan gaya tekan terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 10 dan besarnya adalah 575,8 N. Torsi terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 3 dan besarnya adalah 4.818 Nm, sedangkan torsi terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 16 dan besarnya adalah 1,676 Nm. Kekasaran permukaan terbesar didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 15 dan besarnya adalah 6,01 μm , sedangkan kekasaran permukaan terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 7 dan besarnya adalah 2,48 μm . Keausan tepi pahat terbesar

didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 10 dan besarnya adalah 61,5 μm , sedangkan keausan tepi pahat terkecil didapatkan pada kombinasi variabel proses ke 9 dan besarnya adalah 25,1 μm .

4.2 Optimasi Multirespon Taguchi-GRA

4.2.1 Penghitungan Rasio S/N

Penghitungan nilai rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respon. Respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat memiliki kesamaan karakteristik kualitas, yaitu semakin kecil semakin baik (*smaller is better*) dan rasio S/N tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan 2.47. Contoh penghitungan rasio S/N dari gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right]$$

$$S/N = -10 \log \frac{712,15^2}{1}$$

$$S/N = -57,0514$$

Penghitungan nilai rasio S/N masing-masing respon pada setiap kombinasi variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Rasio S/N pada Masing-masing Respon

No	Fz	T	Ra	VB	SNR_Fz	SNR_T	SNR_SR	SNR_VB
1	712,15	3,315	4,36	41,13	-57,0514	-10,4097	-12,7798	-32,2821
2	1228	3,681	3,38	46,50	-61,784	-11,3181	-10,5848	-33,3491
3	1464	4,818	4,25	59,75	-63,3108	-13,6564	-12,5576	-35,5268
4	1012,5	2,438	3,97	39,00	-60,1079	-7,73889	-11,9703	-31,8213
5	1099	3,347	2,93	42,25	-60,8200	-10,4918	-9,32252	-32,5165
6	1304	4,338	3,68	49,58	-62,3056	-12,7448	-11,3170	-33,9067
7	1123	1,812	2,48	36,58	-61,0076	-5,16316	-7,89779	-31,2657
8	1462,5	2,810	3,58	39,33	-63,3019	-8,97413	-11,0716	-31,8952
9	1870	3,666	4,51	25,08	-65,4368	-11,2827	-13,0835	-27,9877
10	575,8	2,760	4,00	61,50	-55,2054	-8,81661	-12,0412	-35,7775
11	864,05	3,326	4,60	35,33	-58,7308	-10,4384	-13,2552	-30,9637
12	1299	4,565	4,76	39,25	-62,2722	-13,1888	-13,5521	-31,8768
13	897	2,300	4,04	46,08	-59,0558	-7,23267	-12,1330	-33,2709
14	1333	3,054	3,61	50,08	-62,4966	-9,69738	-11,1562	-33,9939
15	1404,5	4,052	6,01	37,67	-62,9504	-12,1534	-15,5703	-31,5191
16	999,5	1,676	3,24	38,42	-59,9957	-4,48548	-10,2109	-31,6904
17	1431	2,606	4,34	27,25	-63,1128	-8,31782	-12,7448	-28,7073
18	1607	3,591	4,24	27,40	-64,1203	-11,1043	-12,5422	-28,7550

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.2 Normalisasi Rasio S/N

Proses normalisasi rasio S/N adalah proses untuk mengubah nilai rasio S/N menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1 agar nilai normalisasi tidak memiliki dimensi dan digunakan untuk menyamakan satuan pada respon. Proses normalisasi dilakukan berdasarkan karakteristik kualitas. Karakteristik kualitas dari respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is better*). Perhitungan normalisasi dilakukan dengan menggunakan rumus 2.51. Contoh penghitungan normalisasi rasio S/N gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama, adalah:

1. Penentuan nilai maksimum dan minimum dari rasio S/N
 Nilai maksimum rasio S/N gaya tekan (F_z) = -55,2054

Nilai minimum rasio S/N gaya tekan (F_z) = -65,4368

2. Penghitungan normalisasi rasio S/N

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)}, i = 1, 2, \dots, 18, k = 1, 2, 3, 4.$$

$$X_i^*(1) = \frac{-57,0514 - (-54,4368)}{-55,2054 - (-65,4368)}$$

$$X_i^*(1) = 0,819575$$

Hasil perhitungan normalisasi rasio S/N masing-masing respon untuk setiap kombinasi variabel proses dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Normalisasi Rasio S/N

No	X_i_{Fz}	X_i_T	X_i_{SR}	X_i_{VB}
1	0,18042	0,64597	0,63630	0,55129
2	0,64298	0,74503	0,35021	0,68825
3	0,79221	1,00000	0,60734	0,96781
4	0,47916	0,35475	0,53080	0,49213
5	0,54875	0,65493	0,18569	0,58138
6	0,69395	0,90059	0,44564	0,75984
7	0,56709	0,07389	0,00000	0,42080
8	0,79134	0,48944	0,41366	0,50162
9	1,00000	0,74116	0,67589	0,00000
10	0,00000	0,47227	0,54004	1,00000
11	0,34456	0,64911	0,69826	0,38204
12	0,69069	0,94901	0,73697	0,49925
13	0,37633	0,29955	0,55200	0,67822
14	0,71263	0,56831	0,42468	0,77103
15	0,75698	0,83611	1,00000	0,45334
16	0,46819	0,00000	0,30148	0,47533
17	0,77285	0,41788	0,63174	0,09238
18	0,87113	0,72172	0,60533	0,09850

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.3 Perhitungan *Deviation Sequence*

Sebelum penghitungan nilai GRC dilakukan, nilai *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ dari masing-masing respon dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.53. Contoh penghitungan *deviation sequence* gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_i(k) - X_i^*(k)|$$

$$\Delta_{0,1}(1) = |1 - 0,1804246|$$

$$\Delta_{0,1}(1) = 0,8195754$$

Hasil penghitungan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ dari masing-masing respon untuk setiap kombinasi variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai *Deviation Sequence*

No	Δ_Fz	Δ_T	Δ_SR	Δ_VB
1	0,81958	0,35403	0,36370	0,44871
2	0,35702	0,25497	0,64979	0,31175
3	0,20779	0,00000	0,39266	0,03219
4	0,52084	0,64525	0,46920	0,50787
5	0,45125	0,34507	0,81431	0,41862
6	0,30605	0,09941	0,55436	0,24016
7	0,43291	0,92611	1,00000	0,57920
8	0,20866	0,51056	0,58634	0,49838
9	0,00000	0,25884	0,32411	1,00000
10	1,00000	0,52773	0,45996	0,00000
11	0,65544	0,35089	0,30174	0,61796
12	0,30931	0,05099	0,26303	0,50075
13	0,62367	0,70045	0,44800	0,32178
14	0,28737	0,43169	0,57532	0,22897
15	0,24302	0,16389	0,00000	0,54666
16	0,53181	1,00000	0,69852	0,52467
17	0,22715	0,58212	0,36826	0,90762
18	0,12867	0,27828	0,39467	0,90150

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.4 Perhitungan *Grey Relational Coefficient* (GRC) dan *Grey Relational Grade* (GRG)

Setelah melakukan perhitungan *deviation sequence*, langkah selanjutnya adalah melakukan penghitungan GRC dengan menggunakan persamaan 2.54 yang didasarkan pada nilai *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$. *Grey relational grade* (GRG) digunakan sebagai variabel yang mewakili repon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan tepi pahat secara serentak. Perhitungan GRG dilakukan dengan merata-ratakan nilai GRC pada masing-masing respon. Contoh penghitungan GRC gaya tekan (F_z) untuk kombinasi variabel proses pertama adalah:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{\max}}$$

$$\xi_i(1) = \frac{0 + (0,5 \times 1)}{0.8195754 + (0,5 \times 1)}$$

$$\xi_i(1) = 0,3789098$$

Hasil penghitungan GRC dan GRG masing-masing respon untuk setiap kombinasi variabel proses ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Nilai GRC dan GRG

No	GRC Fz	GRC T	GRC SR	GRC VB	GRG
1	0,3789	0,5855	0,5789	0,5270	0,48979
2	0,5834	0,6623	0,4349	0,6160	0,57901
3	0,7064	1,0000	0,5601	0,9395	0,77763
4	0,4898	0,4366	0,5159	0,4961	0,47899
5	0,5256	0,5917	0,3804	0,5443	0,51733
6	0,6203	0,8342	0,4742	0,6755	0,65901
7	0,5360	0,3506	0,3333	0,4633	0,43447
8	0,7056	0,4948	0,4603	0,5008	0,58163
9	1,0000	0,6589	0,6067	0,3333	0,78511
10	0,3333	0,4865	0,5209	1,0000	0,44858
11	0,4327	0,5876	0,6236	0,4472	0,51985
12	0,6178	0,9075	0,6553	0,4996	0,70931
13	0,4450	0,4165	0,5274	0,6084	0,46030
14	0,6350	0,5367	0,4650	0,6859	0,57250
15	0,6729	0,7531	1,0000	0,4777	0,75524
16	0,4846	0,3333	0,4172	0,4880	0,42447
17	0,6876	0,4621	0,5759	0,3552	0,58050
18	0,7953	0,6424	0,5589	0,3568	0,68050

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.5 Kombinasi Variabel Proses untuk Respon Optimal

Penghitungan nilai rata-rata GRG digunakan untuk menentukan kombinasi level dari variabel proses. Kombinasi level dari variabel proses dapat mengoptimalkan respon gaya tekan, torsi, kebulatan dan kekasaran permukaan. Contoh penghitungan nilai rata-rata dari GRG untuk variabel proses sudut ujung pahat pada level 1 adalah:

$$\bar{\eta}_{V1} = \frac{0,48979+0,57901+0,77763+0,47899+0,51733+0,65901}{6}$$

$$\bar{\eta}_{V1} = 0,589218$$

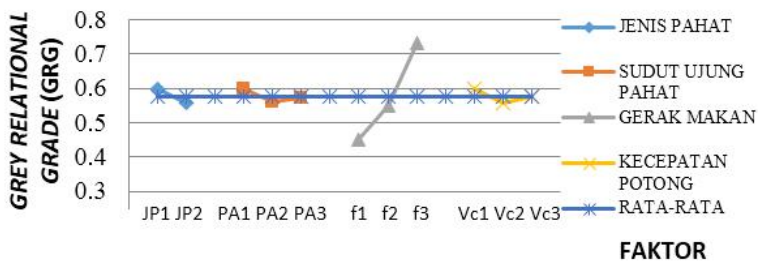
Penghitungan nilai rata-rata GRG dilakukan pada setiap level dari kombinasi variabel proses. Tabel 4.6 menunjukkan hasil penghitungan nilai rata-rata GRG dan berfungsi untuk memudahkan penentuan kombinasi variabel proses yang terbaik.

Tabel 4.6 Nilai Rata-Rata GRG

Parameter proses	Level 1	Level 2	Level 3	Selisih
Jenis pahat	0,5892	0,5724		0,0168
Sudut ujung pahat	0,5874	0,5739	0,5585	0,0289
Gerak makan	0,4561	0,5585	0,7278	0,2717
Kecepatan potong	0,6016	0,5635	0,5773	0,0243
Rata-rata	0,5808			

Sumber: Hasil penghitungan

Gambar 4.1 menunjukkan grafik nilai rata-rata dari GRG pada masing-masing level dari faktor, yaitu jenis pahat, sudut ujung pahat, gerak makan, kecepatan potong.



Gambar 4.1 Grafik nilai rata-rata GRG pada masing-masing level variabel proses

Berdasarkan nilai rata-rata GRG dari Tabel 4.6 dan grafik dari Gambar 4.1 pada masing-masing level dari variabel proses, nilai level pada kombinasi variabel proses yang menghasilkan respon yang optimum dapat ditentukan. Kombinasi variabel proses tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.7. Penentuan kombinasi variabel proses yang optimum didasarkan pada nilai rata-rata GRG yang memiliki nilai rata-rata terbesar dari setiap variabel proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Tabel 4.7 Kombinasi Variabel Proses untuk Respon Optimal

Variabel proses	Tingkat Level	Nilai Level
Jenis pahat	Level 1	HSS-M2
Sudut ujung pahat (°)	Level 1	102
Gerak makan (mm/rev)	Level 3	0,1
Kecepatan potong (m/menit)	Level 1	25

Sumber: Hasil penghitungan

4.2.6 Analisis Variansi dan Persen Kontribusi

Analisis variansi (ANOVA) digunakan pada variabel proses yang memiliki level lebih dari dua untuk mengetahui variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon, serta menunjukkan besarnya kontribusi variabel proses terhadap respon. Pada penelitian ini, analisis variansi dilakukan pada GRG yang merupakan respon yang mewakili keseluruhan respon.

Penghitungan jumlah kuadrat total pada analisis variansi GRG dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.35 yang dijabarkan sebagai berikut:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\begin{aligned}
 SS_T = & (0,4898 - 0,5808)^2 + (0,5790 - 0,5808)^2 + (0,7776 - 0,5808)^2 + \\
 & (0,4790 - 0,5808)^2 + (0,5173 - 0,5808)^2 + (0,6590 - 0,5808)^2 + \\
 & (0,4345 - 0,5808)^2 + (0,5816 - 0,5808)^2 + (0,4486 - \\
 & 0,5808)^2 + (0,5198 - 0,5808)^2 + (0,7093 - 0,5808)^2 + (0,4603 - \\
 & 0,5808)^2 + (0,5725 - 0,5808)^2 + (0,7552 - 0,5808)^2 + \\
 & (0,4245 - 0,5808)^2 + (0,5805 - 0,5808)^2 + (0,6805 - 0,5808)^2
 \end{aligned}$$

$$SS_T = 0,247807$$

Contoh penghitungan untuk jumlah kuadrat total variabel proses sudut ujung pahat dengan menggunakan persamaan 2.36 adalah sebagai berikut:

$$SS_{PA} = n_{A_i} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$$

$$SS_{PA} = [(0,5874 - 0,5808)^2 + (0,5739 - 0,5808)^2 + (0,5811 - 0,5808)^2] \times 6$$

$$SS_{PA} = 0,000545$$

Contoh penghitungan rata-rata kuadrat untuk variabel kecepatan spindel berdasarkan persamaan 2.39 adalah sebagai berikut:

$$MS_{PA} = \frac{SS_{PA}}{v_{PA}}$$

$$MS_{PA} = \frac{0,000545}{2}$$

$$MS_{PA} = 0,000273$$

Tabel analisis variansi yang berdasarkan pada hasil penghitungan GRG ditunjukkan pada Tabel 4.8. Tabel analisis variansi disusun seperti pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 ANAVA untuk GRG

<i>Source</i>	DF	Seq SS	MS	F	P-value
JP	1	0,001279	0,001279	0,82	0,386
PA	2	0,000545	0,000273	0,18	0,842
f	2	0,225949	0,112974	72,55	0,000
Vc	2	0,004463	0,002231	1,43	0,284
Error	10	0,015572	0,001557		
Total	17	0,247807			

Sumber: Perhitungan menggunakan program Minitab 16

Variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon dapat diuji dengan menggunakan uji distribusi F. Variabel proses jenis pahat, sudut ujung pahat, gerak makan dan kecepatan potong dipilih secara *fixed*, sehingga pengujian hipotesis yang digunakan adalah:

1. Variabel proses jenis pahat (JP)

$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$ (variabel proses jenis pahat (JP) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\alpha_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, a$ (variabel proses jenis pahat (JP) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 0,82$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_{TM}, v_E} = F_{0,05,1,10} = 4,96$, sehingga H_0 gagal ditolak, karena $F_{hitung} < F_{tabel}$. Maka dapat disimpulkan bahwa variabel proses jenis pahat (JP) tidak berpengaruh terhadap GRG.

2. Variabel proses sudut ujung pahat (PA)

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ (variabel proses sudut ujung pahat (PA) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\beta_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, a$ (variabel proses sudut ujung pahat (PA) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 0,18$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_{PA}, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4,10$, sehingga H_0 gagal ditolak, karena $F_{hitung} < F_{tabel}$, yang berarti bahwa variabel proses sudut ujung pahat (PA) tidak berpengaruh terhadap GRG.

3. Variabel proses gerak makan (f)

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ (variabel proses gerak makan (f) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\tau_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, a$ (variabel proses gerak makan (f) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 72,55$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_N, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4,10$, sehingga H_0 ditolak, karena $F_{hitung} > F_{tabel}$, yang berarti bahwa variabel proses gerak makan (f) memiliki pengaruh terhadap GRG.

4. Variabel proses kecepatan potong (Vc)

$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$ (variabel proses kecepatan potong (Vc) tidak memiliki pengaruh terhadap GRG)

H_1 : Paling sedikit ada satu $\gamma_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3, \dots$, a (variabel proses kecepatan potong (Vc) memiliki pengaruh terhadap GRG)

Kesimpulan: $F_{hitung} = 1,43$ dan $F_{tabel} = F_{\alpha, v_A, v_E} = F_{0,05,2,10} = 4,10$, sehingga H_0 gagal ditolak, karena $F_{hitung} < F_{tabel}$, yang berarti bahwa variabel proses kecepatan potong (Vc) tidak berpengaruh terhadap GRG.

Dari ANAVA untuk GRG dapat disimpulkan bahwa jenis pahat, sudut ujung pahat dan kecepatan potong tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap GRG sedangkan gerak makan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap GRG.

Persen kontribusi mengindikasikan kekuatan relatif/porsi dari masing-masing variabel proses untuk mengurangi variansi total repon yang diamati. Jika besar kontribusi *error* kurang dari lima belas persen, maka tidak ada variabel proses yang berpengaruh terabaikan. Jika besarnya kontribusi *error* lebih dari lima belas persen, maka hal tersebut mengindikasikan adanya variabel proses yang berpengaruh terabaikan.

Persen kontribusi dihitung dengan menggunakan persamaan 2.60 dan 2.61. Penghitungan persen kontribusi dilakukan dari hasil analisis variansi yang ditunjukkan pada Tabel 4.8. Hasil penghitungan persen kontribusi ditunjukkan pada tabel 4.9. Contoh penghitungan persen kontribusi pada variabel proses sudut ujung pahat (PA) adalah:

$$SS'_{PA} = SS_{PA} - db_{PA}.MS_E$$

$$SS'_{PA} = 0,000545 - (2 \times 0,001557)$$

$$SS'_{PA} = -0,00028$$

sehingga

$$\rho_{PA} = \frac{SS'_{PA}}{SS_T} \times 100\%$$

$$\rho_{PA} = \frac{0,00278}{0,24384} \times 100\%$$

$$\rho_{PA} = -1,04\%$$

Tabel 4.9 ANAVA dan Persen Kontribusi untuk GRG

<i>Source</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>% Kontribusi</i>
JP	1	0,001279	0,001279	0,82	0,386	-0,11% (0%)
PA	2	0,000545	0,000273	0,18	0,842	-1,04% (0%)
f	2	0,225949	0,112974	72,55	0,000	89,92%
Vc	2	0,004463	0,002231	1,43	0,284	0,54%
Error	10	0,015572	0,001557			10,68%
Total	17	0,247807				100%

Sumber: Hasil perhitungan

Keterangan: hasil minus pada persen kontribusi dimutlakan atau menjadi 0% yang artinya tidak menunjukkan adanya kontribusi.

Hasil penghitungan persen kontribusi menunjukkan bahwa variabel proses gerak makan (f) memberikan kontribusi terbesar, yaitu sebesar 89,92% untuk mengurangi variansi total dari respon yang diamati secara serentak. Persen kontribusi dari faktor kecepatan potong (Vc) adalah sebesar 0,54%, sedangkan kontribusi faktor sudut ujung pahat (PA) dan faktor jenis pahat (JP) adalah sebesar 0%.

4.2.7 Prediksi Multirespon Optimal dan Interval Keyakinan

Hasil penghitungan rata-rata GRG menunjukkan kombinasi variabel proses untuk respon yang optimum, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7. Hasil penghitungan rata-rata GRG dapat digunakan untuk memprediksi nilai GRG yang optimal. Kombinasi dari masing-masing variabel proses yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap GRG yang optimal adalah:

1. Variabel proses jenis pahat (JP) pada level 1
2. Variabel proses sudut ujung pahat (PA) pada level 1
3. Variabel proses gerak makan (f) pada level 3
4. Variabel proses kecepatan makan (Vc) pada level 1

Penghitungan prediksi nilai GRG dengan menggunakan persamaan 2.59 dijabarkan sebagai berikut:

$$\hat{y} = \gamma_m + \sum_{i=1}^o (\bar{\gamma}_i - \gamma_m)$$

$$\hat{y} = 0,5808 + (0,5892 - 0,5808) + (0,5874 - 0,5808) + (0,7278 - 0,5808) + (0,6016 - 0,5808)$$

$$\hat{y} = 0,7636$$

Dengan demikian, nilai GRG yang dihitung untuk menghasilkan respon yang optimum dari kombinasi variabel proses adalah 0.7636.

Penghitungan banyaknya pengamatan efektif (n_{eff}) dilakukan terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.64, kemudian penghitungan interval keyakinan untuk kondisi optimum dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.62 dan 2.63. Penghitungan n_{eff} adalah sebagai berikut:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan variabel proses untuk menduga rata - rata}}$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{\text{eff}} = 4,5$$

Penghitungan interval keyakinan untuk kondisi optimum memerlukan nilai F dan MS_E . Nilai F adalah $F_{(0.05;1;10)} = 4,96$ dan nilai MS_E berdasarkan pada Tabel 4.8 adalah sebesar 0,001682. Penghitungan interval keyakinan untuk kondisi optimum adalah sebagai berikut:

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;v_E} \cdot MS_E}{n_{eff}}}$$

$$CI_1 = \sqrt{\frac{4,96 \times 0,001682}{4,5}}$$

$$CI_1 = \pm 0,0430$$

Dengan demikian, interval keyakinan 95% untuk rata-rata GRG pada kombinasi yang optimal (GRG prediksi) adalah $0,7636 \pm 0,0430$ atau $0,7206 \leq GRG_{prediksi} \leq 0,8066$.

4.2.8 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi bertujuan untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diperoleh. Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan menggunakan kombinasi variabel proses yang dihasilkan dari hasil optimasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7. Hal tersebut dilakukan untuk membandingkan interval keyakinan rata-rata GRG prediksi dengan interval keyakinan rata-rata GRG eksperimen konfirmasi. Eksperimen konfirmasi dilakukan sebanyak tiga kali untuk respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan pahat. Hasil eksperimen konfirmasi dari masing-masing respon dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Eksperimen Konfirmasi pada Masing-masing Respon

No	Kombinasi variabel proses				F_z (N)	M_t (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Keausan tepi pahat (μm)
	JP	PA	f	Vc				
1	1	1	3	1	1441	3,432	5,45	50,96
2	1	1	3	1	1458	3,683	5,82	51,54
3	1	1	3	1	1448	3,539	5,66	51,25
Rata-rata					1449	3,551	5,64	51,25

Sumber: Hasil pengukuran

Penghitungan rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.47 yang didasarkan pada nilai-nilai respon yang didapatkan dari eksperimen konfirmasi. Hasil perhitungan rasio S/N dari masing-masing respon ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi

No	SNRA_ F_z	SNRA_ T	SNRA_ SR	SNRA_ VB
1	-63,2214	-11,0078	-15,0307	-34,1939

Sumber: Hasil penghitungan

Normalisasi dilakukan pada rasio S/N dari masing-masing respon dengan menggunakan persamaan 2.51. Hasil penghitungan proses normalisasi ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Normalisasi Rasio S/N Eksperimen Konfirmasi

No	ξ_i F_z	ξ_i T	ξ_i SR	ξ_i VB
1	0,78346	0,71120	0,92968	0,79671

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan *deviation sequence* $\Delta_{0,i}(k)$ dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.53 yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 *Deviation sequence* Masing-Masing Respon

No	Δ_{F_z}	Δ_T	Δ_{SR}	Δ_{VB}
1	0,21654	0,28880	0,07032	0,20329

Sumber: Hasil penghitungan

Penghitungan GRG dilakukan pada langkah akhir yang sebelumnya didahului dengan perhitungan GRC menggunakan persamaan 2.54. Tabel 4.14 menunjukkan nilai GRC dan GRG hasil dari eksperimen konfirmasi. Nilai GRG didapatkan dari penghitungan rata-rata nilai GRC pada respon.

Tabel 4.14 GRG Eksperimen Konfirmasi pada Kombinasi

No	GRC_ F_z	GRC_ T	GRC_ SR	GRC_ VB	GRG
1	0,6978	0,6339	0,8767	0,7109	0.7298

Sumber: Hasil penghitungan

Banyaknya pengamatan efektif dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.64. Perhitungan interval keyakinan rata-rata GRG eksperimen konfirmasi dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.63 dan 2.65. Penghitungan banyaknya pengamatan efektif adalah sebagai berikut:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan faktor} - \text{faktor untuk menduga rata - rata}}$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{18 \times 2}{1 + (1 + 2 + 2 + 2)}$$

$$n_{\text{eff}} = 4.5$$

Penghitungan interval keyakinan rata-rata GRG eksperimen konfirmasi memerlukan nilai F , MS_E , dan r . Nilai F adalah $F_{(0.05;1;10)} = 4.96$, nilai MS_E berdasarkan pada ANAVA GRG dari Tabel 4.8 dan nilai r adalah jumlah pengulangan yang dilakukan pada eksperimen konfirmasi. Penghitungan interval keyakinan rata-rata GRG eksperimen konfirmasi dijabarkan sebagai berikut:

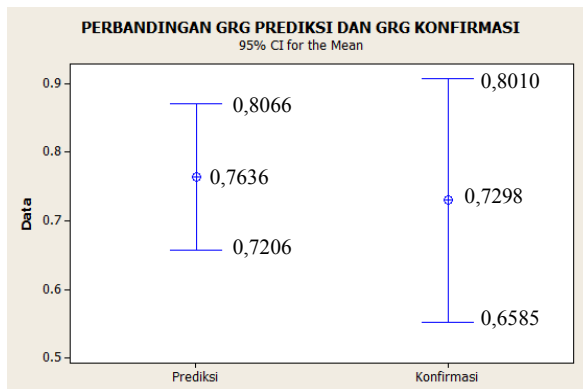
$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;vE} \cdot MS_E \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI_2 = \sqrt{4.96 \times 0,001682 \times \left[\frac{1}{4.5} + \frac{1}{3} \right]}$$

$$CI_2 = \pm 0,0712$$

Dengan demikian, interval keyakinan 95% untuk rata-rata GRG eksperimen konfirmasi adalah $0,7298 \pm 0,0712$ atau $0,6585 \leq GRG_{konfirmasi} \leq 0,8010$.

Interval keyakinan 95% rata-rata GRG optimasi dengan interval keyakinan 95% rata-rata GRG eksperimen konfirmasi diplotkan secara bersamaan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Plot Interval keyakinan hasil optimasi dan eksperimen konfirmasi

Berdasarkan Gambar 4.2, hasil plot antara interval keyakinan dari rata-rata prediksi dengan interval keyakinan dari rata-rata eksperimen konfirmasi menunjukkan bahwa nilai rata-rata eksperimen konfirmasi berada didalam interval nilai prediksi. Selain itu interval keyakinan nilai rata-rata eksperimen konfirmasi

lebih lebar daripada interval keyakinan nilai rata-rata prediksi karena eksperimen konfirmasi memiliki jumlah sampel yang sedikit. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengaturan kombinasi level variabel proses pada kondisi optimum yang telah didapat valid.

4.2.9 Perbandingan antara Respon Hasil Kombinasi Awal dengan Respon Hasil Kombinasi Optimum

Pada penelitian ini juga dilakukan perbandingan eksperimen menggunakan kombinasi optimum dengan eksperimen menggunakan kombinasi awal. Kombinasi awal merupakan kombinasi variabel proses yang diatur pada level tengah, dalam hal ini variabel proses diatur pada level 2 untuk setiap variabel proses. Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk mengetahui *improvement* dari masing-masing respon. Hal ini dilakukan dengan membandingkan hasil respon pada kombinasi awal dengan hasil respon pada kombinasi optimum. Level dari variabel proses-variabel proses untuk kombinasi awal ditunjukkan oleh Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Kombinasi Variabel Proses untuk Kombinasi Awal

Variabel proses	Kombinasi Awal	
	Nilai	Level
Jenis pahat	HSS-M35	2
Sudut ujung pahat (°)	118	2
Gerak makan (mm/rev)	0,07	2
Kecepatan potong (m/menit)	37	2

Sumber: Hasil pemilihan kombinasi awal

Eksperimen dengan kombinasi awal dilakukan sebanyak tiga kali replikasi, dan hasil dari masing-masing respon dari eksperimen tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil Respon dengan Menggunakan Kombinasi Awal

No	Kombinasi variabel proses				F_z (N)	M_t (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Keausan tepi pahat (μm)
	JP	PA	f	Vc				
1	2	2	2	2	1568	3,522	6,21	55,42
2	2	2	2	2	1559	3,643	5,87	52,78
3	2	2	2	2	1575	3,621	5,98	54,93
Rata-rata					1567,33	3,60	6,02	54,38

Sumber: Hasil penghitungan

Perbandingan dari masing-masing respon secara individu antara kombinasi awal dengan kombinasi optimum ditunjukkan pada Tabel 4.16. Karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik dari semua respon terpenuhi. Hal ini ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai dari semua respon tersebut pada kombinasi optimum. Hasil yang diperoleh telah sesuai dengan tujuan optimasi, yaitu menurunkan gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan pahat. Hasil optimasi telah dinyatakan valid, karena rata-rata konfirmasi berada dalam interval keyakinan prediksi.

Tabel 4.17 Perbandingan Respon dengan Menggunakan Kombinasi Awal dengan Kombinasi Optimum

Respon	Kombinasi Awal	Kombinasi Optimum
Gaya tekan (N)	1567,33	1449
Torsi (Nm)	3,60	3,551
Kekasaran permukaan (μm)	6,02	5,64
Keausan tepi pahat (μm)	54,38	51,25

Sumber: Hasil penghitungan

4.3 Analisis Pengaruh Variabel Proses terhadap Masing-masing Respon

Analisis variansi pada tabel 4.9 menunjukkan bahwa variabel proses gerak makan memiliki pengaruh yang signifikan dalam menurunkan variansi dari respon gaya tekan, torsi, kekasaran permukaan dan keausan pahat secara serentak, dimana semua respon memiliki karakteristik semakin kecil semakin baik.

Variabel proses jenis pahat, sudut ujung pahat dan kecepatan potong dinilai tidak signifikan dalam menurunkan variansi respon secara serentak.

Analisis variansi juga dilakukan untuk respon individu. Berikut ini adalah ringkasan analisis variansi untuk respon individu yang ditunjukkan pada tabel 4.18.

Tabel 4.18 Persen Kontribusi Variabel Proses terhadap Respon Individu

Sumber	Gaya tekan	Torsi	Kekasaran permukaan	Kekasaran tepi pahat
	%	%	%	%
Jenis pahat (JP)	1,91%	1,37%	15,85%	0,57%
Sudut ujung pahat (PA)	25,08%	22,82%	7,77%	42,98%
Gerak makan (f)	60,30%	72,38%	28,99%	2,88%
Kecepatan potong (Vc)	-0,64%	0,16%	32,49%	43,29%
Error	13,35%	3,27%	14,90%	10,27%

Sumber: Hasil perhitungan

4.3.1 Pengaruh Variabel Proses terhadap Gaya Tekan

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi gaya tekan adalah gerak makan dan sudut ujung pahat seperti terlihat pada Tabel 4.18. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi gaya tekan paling besar diberikan oleh variabel gerak makan sebesar 60,30%, diikuti oleh sudut ujung pahat sebesar 25,08%, jenis pahat sebesar 1,91% dan kecepatan potong sebesar 0%. Gerak makan memiliki kontribusi paling besar untuk mengurangi variansi gaya tekan, dikarenakan semakin besar gerak makan maka semakin besar nilai gaya tekan. Hal ini sesuai dengan teori rumus empiris gaya tekan pada proses gundi, bahwa semakin besar gerak makan maka akan menghasilkan nilai gaya tekan yang semakin besar. Gaya tekan selain dipengaruhi oleh gerak makan, juga dipengaruhi oleh sudut ujung pahat.

Semakin besar sudut ujung pahat maka semakin besar nilai K_r . Semakin besar nilai K_r maka semakin besar gaya tekan yang dihasilkan pada proses penggurdian (Rochim, 1993).

4.3.2 Pengaruh Variabel Proses terhadap Torsi

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi torsi adalah gerak makan dan sudut ujung pahat seperti terlihat pada Tabel 4.18. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi torsi paling besar diberikan oleh variabel gerak makan sebesar 72,38%, diikuti oleh sudut ujung pahat sebesar 22,82%, jenis pahat sebesar 1,37% dan kecepatan potong sebesar 0,16%. Gerak makan memiliki kontribusi paling besar untuk mengurangi variansi torsi. Hal ini sesuai dengan persamaan empiris untuk menghitung torsi pada proses gudi, bahwa semakin besar gerak makan dan diameter pahat maka torsi yang dihasilkan akan semakin besar (Rochim, 1993). Karena diameter pahat merupakan variabel konstan, maka tidak terdapat pengaruh diameter terhadap torsi pada penelitian ini.

4.3.3 Pengaruh Variabel Proses terhadap Kekasaran Permukaan

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi kekasaran permukaan adalah kecepatan potong dan gerak makan seperti terlihat pada Tabel 4.18. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi kekasaran paling besar diberikan oleh variabel kecepatan potong sebesar 32,49%, diikuti oleh gerak makan sebesar 28,99%, jenis pahat sebesar 15,85% dan sudut ujung pahat sebesar 7,77%. Kecepatan potong memiliki pengaruh yang paling besar untuk mengurangi variansi dari respon kekasaran permukaan. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi kecepatan potong maka semakin besar putaran spindel. Putaran spindel yang semakin tinggi akan memutus aliran geram pada saat proses penggurdian, sehingga akan menurunkan nilai kekasaran permukaan. Hasil ini sesuai dengan

penelitian yang dilakukan Amran. dkk (2013) tentang pengaruh variabel proses terhadap kekasaran permukaan pada proses gundi.

4.3.4 Pengaruh Variabel Proses terhadap Keausan Pahat

Variabel-variabel proses yang berpengaruh dalam mengurangi variansi keausan pahat adalah kecepatan potong dan sudut ujung pahat seperti terlihat pada Tabel 4.18. Kontribusi variabel proses untuk mengurangi variansi keausan pahat paling besar diberikan oleh variabel kecepatan potong sebesar 43,29%, diikuti oleh sudut ujung pahat sebesar 42,98%, gerak makan sebesar 2,88% dan jenis pahat sebesar 0,57%. Kecepatan potong memiliki pengaruh yang paling besar untuk mengurangi variansi keausan pahat. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi kecepatan potong, maka temperatur pada pahat akan semakin tinggi. Temperatur tinggi pada pahat dapat menyebabkan menurunnya kekuatan pahat dan meningkatkan tegangan geser pada mata potong, sehingga terjadi proses deformasi plastis yang menyebabkan keausan pahat (Rochim, 1993). Sudut ujung pahat juga memiliki pengaruh untuk mengurangi variansi keausan pahat. Semakin kecil sudut ujung pahat maka nilai K_r akan juga kecil, nilai K_r yang kecil akan menghasilkan lebar geram (b) yang besar sehingga penampang geram yang dihasilkan akan besar. Penampang geram yang besar akan menghasilkan gaya potong yang besar sehingga dapat menaikkan temperatur pahat. Temperatur pahat yang tinggi dapat menurunkan kekuatan pahat yang dapat menyebabkan terjadinya deformasi plastis (Rochim, 1993).

LAMPIRAN 1
HASIL PENGUKURAN GAYA TEKAN PADA
PERCOBAAN REPLIKASI KE 1 DAN REPLIKASI KE 2

No	JP	PA	f	Vc	R1	R2	Rata-rata
1	1	1	1	1	713	711,3	712,15
2	1	1	2	2	1221	1235	1228
3	1	1	3	3	1450	1478	1464
4	1	2	1	1	1006	1019	1012,5
5	1	2	2	2	1100	1098	1099
6	1	2	3	3	1297	1311	1304
7	1	3	1	2	1134	1112	1123
8	1	3	2	3	1462	1463	1462,5
9	1	3	3	1	1874	1866	1870
10	2	1	1	3	572	579,6	575,8
11	2	1	2	1	863,1	865	864,05
12	2	1	3	2	1301	1297	1299
13	2	2	1	2	891	903	897
14	2	2	2	3	1339	1327	1333
15	2	2	3	1	1402	1407	1404,5
16	2	3	1	3	998	1001	999,5
17	2	3	2	1	1434	1428	1431
18	2	3	3	2	1612	1602	1607

Keterangan:

R1: replikasi 1

R2: replikasi 2

LAMPIRAN 2
HASIL PENGUKURAN TORSI PADA PERCOBAAN
REPLIKASI KE 1 DAN REPLIKASI KE 2

No	JP	PA	f	Vc	R1	R2	Rata-rata
1	1	1	1	1	3,352	3,278	3,315
2	1	1	2	2	3,662	3,699	3,681
3	1	1	3	3	4,821	4,814	4,818
4	1	2	1	1	2,493	2,382	2,438
5	1	2	2	2	3,362	3,331	3,347
6	1	2	3	3	4,365	4,31	4,338
7	1	3	1	2	1,829	1,795	1,812
8	1	3	2	3	2,822	2,798	2,810
9	1	3	3	1	3,682	3,649	3,666
10	2	1	1	3	2,748	2,771	2,760
11	2	1	2	1	3,365	3,287	3,326
12	2	1	3	2	4,543	4,587	4,565
13	2	2	1	2	2,234	2,365	2,300
14	2	2	2	3	3,012	3,096	3,054
15	2	2	3	1	4,114	3,99	4,052
16	2	3	1	3	2,164	1,188	1,676
17	2	3	2	1	2,574	2,637	2,606
18	2	3	3	2	3,618	3,564	3,591

Keterangan:

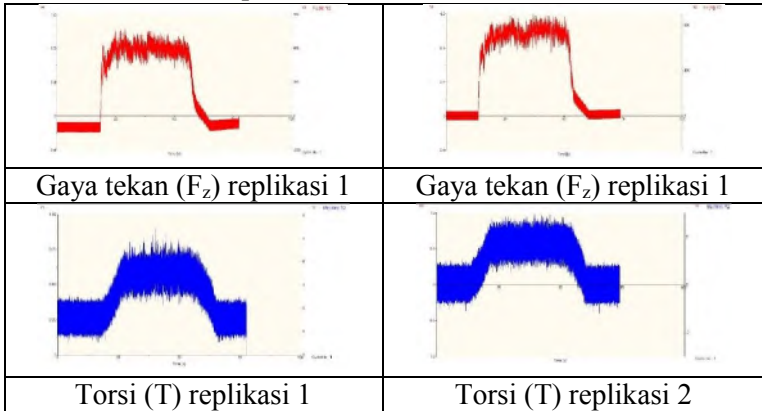
R1: replikasi 1

R2: replikasi 2

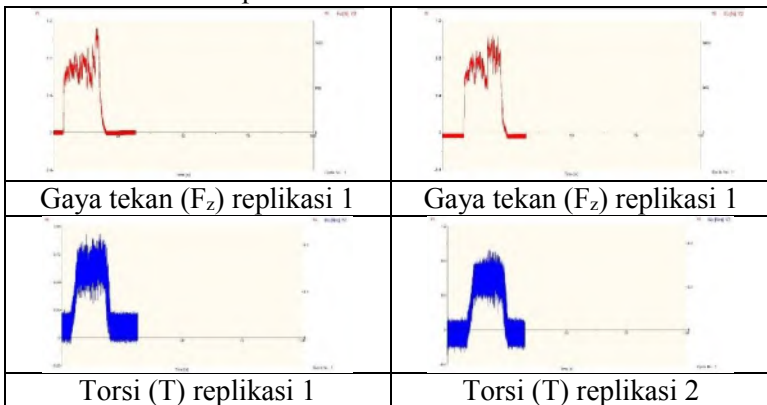
LAMPIRAN 3

GRAFIK GAYA TEKAN DAN TORSI

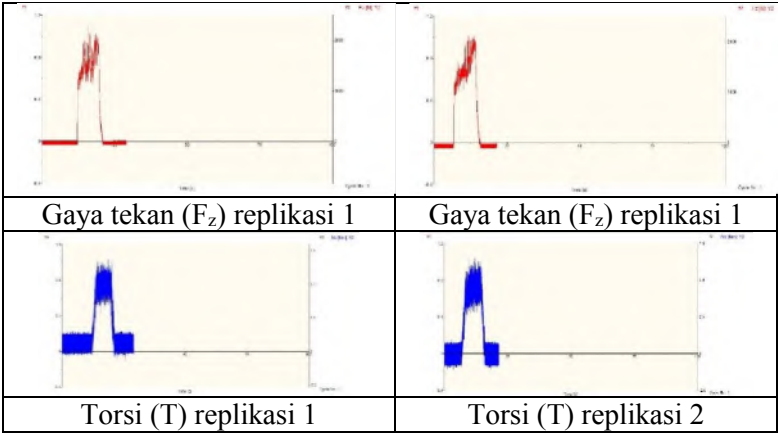
Kombinasi variabel proses 1111



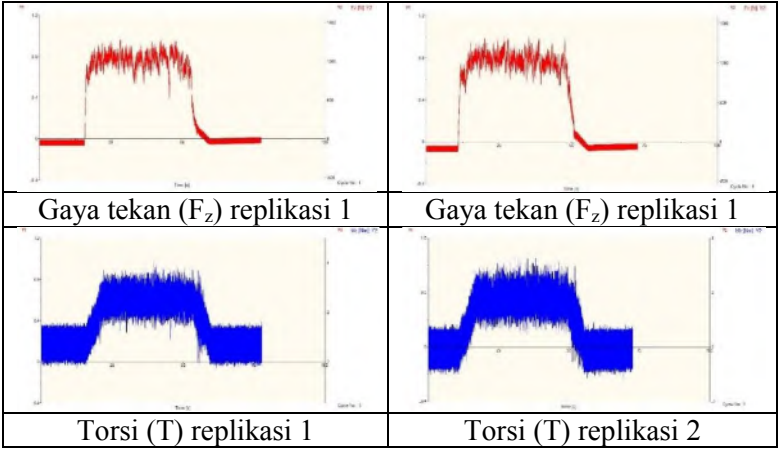
Kombinasi variabel proses 1122



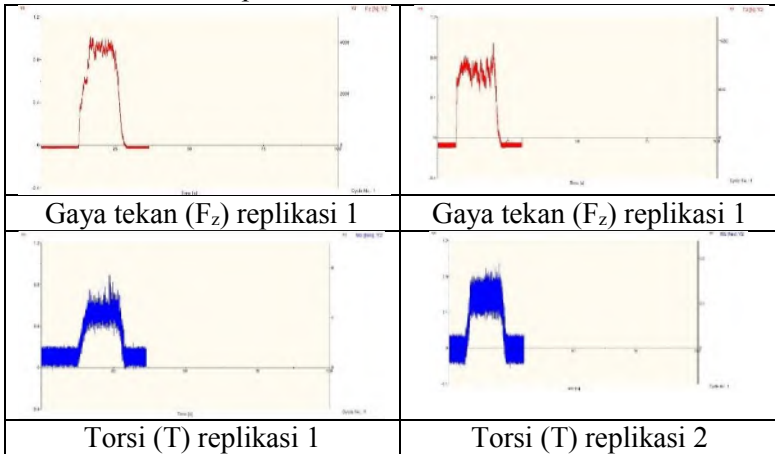
Kombinasi variabel proses 1133



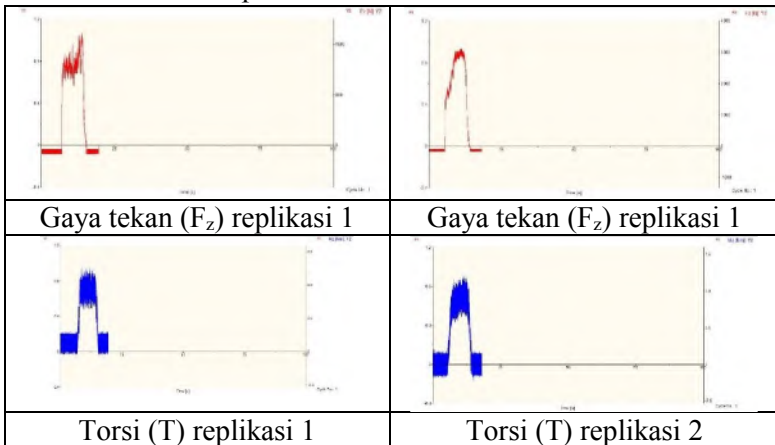
Kombinasi variabel proses 1211



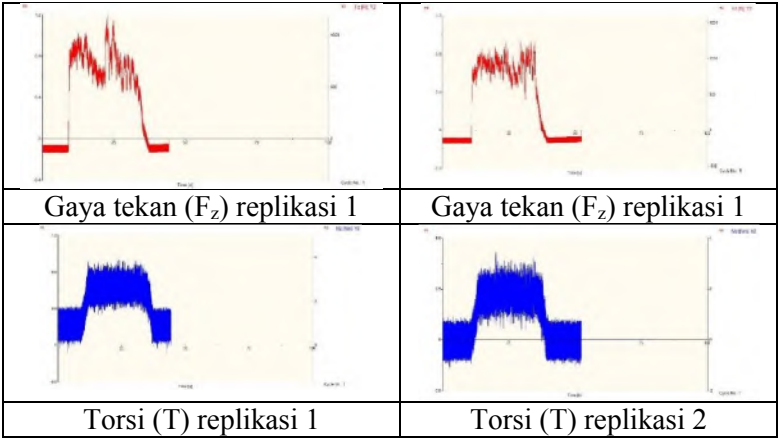
Kombinasi variabel proses 1222



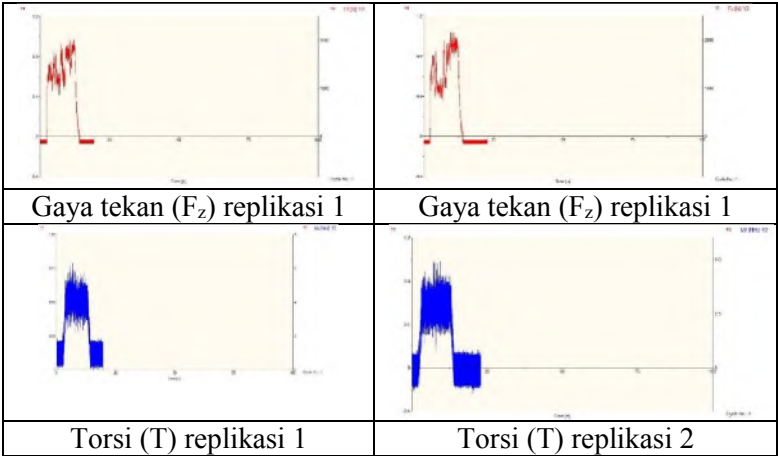
Kombinasi variabel proses 1233



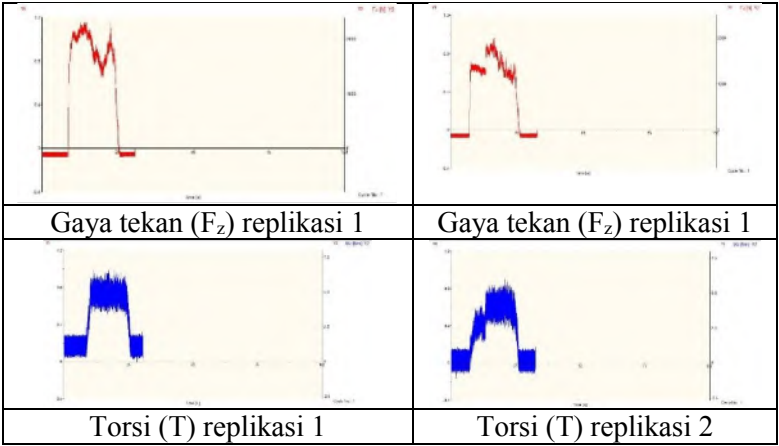
Kombinasi variabel proses 1312



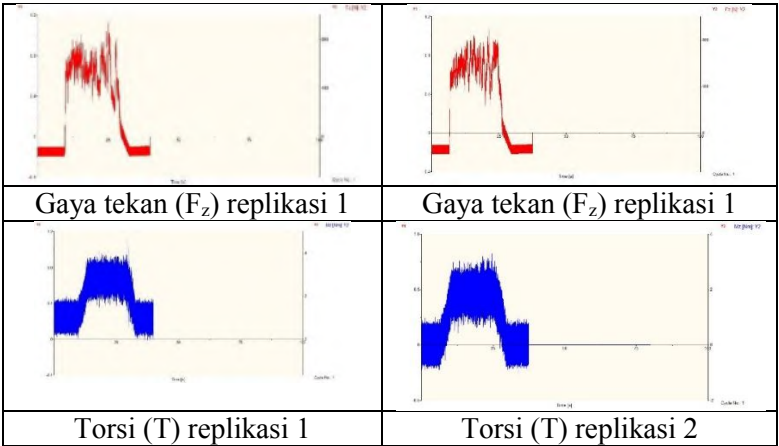
Kombinasi variabel proses 1323



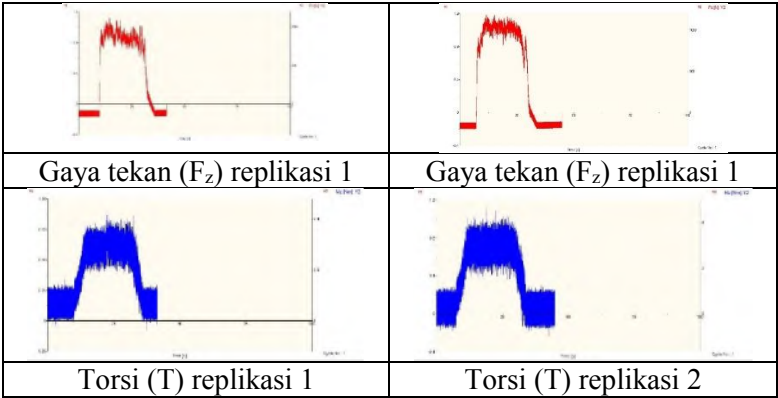
Kombinasi variabel proses 1331



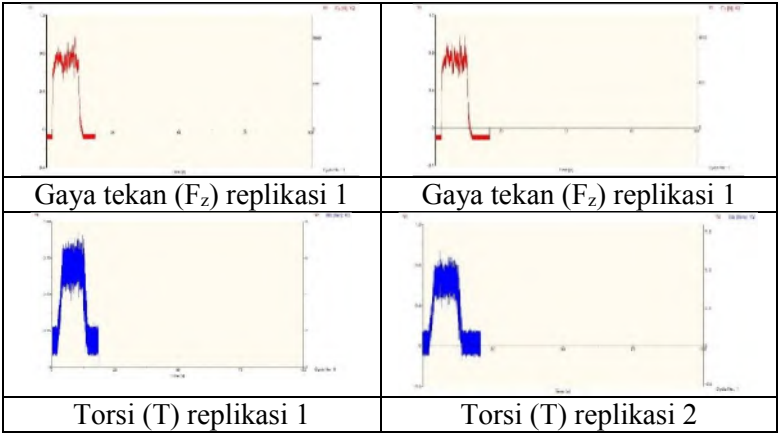
Kombinasi variabel proses 2113



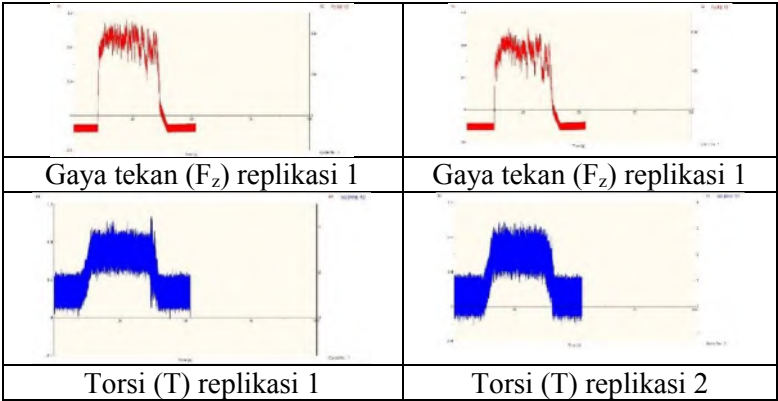
Kombinasi variabel proses 2121



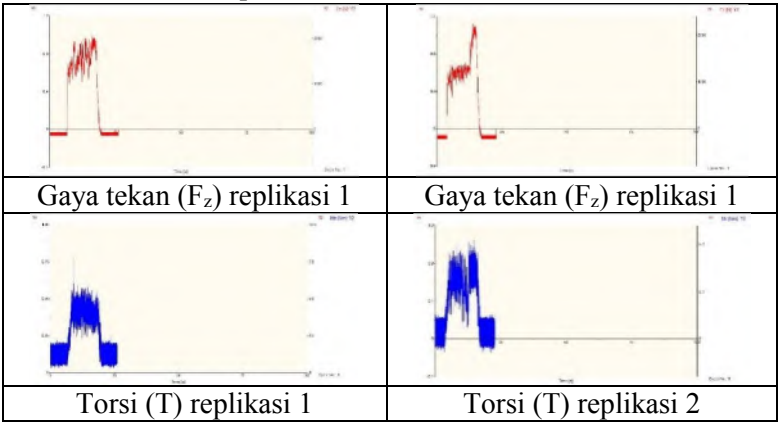
Kombinasi variabel proses 2132



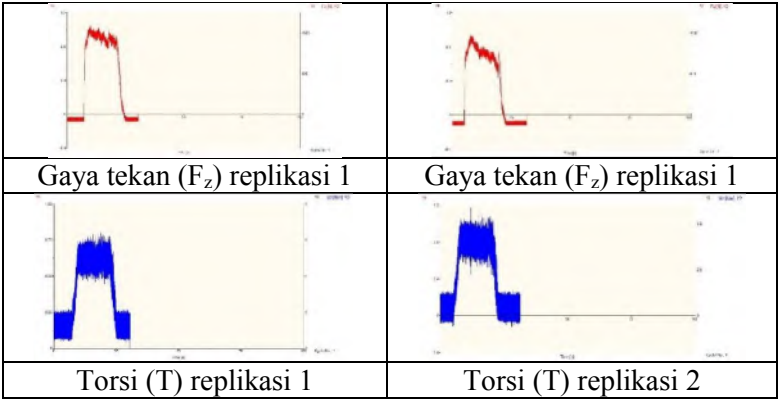
Kombinasi variabel proses 2212



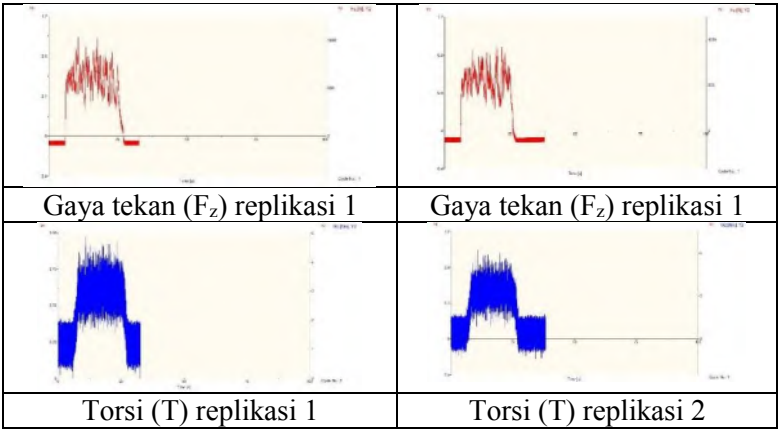
Kombinasi variabel proses 2223



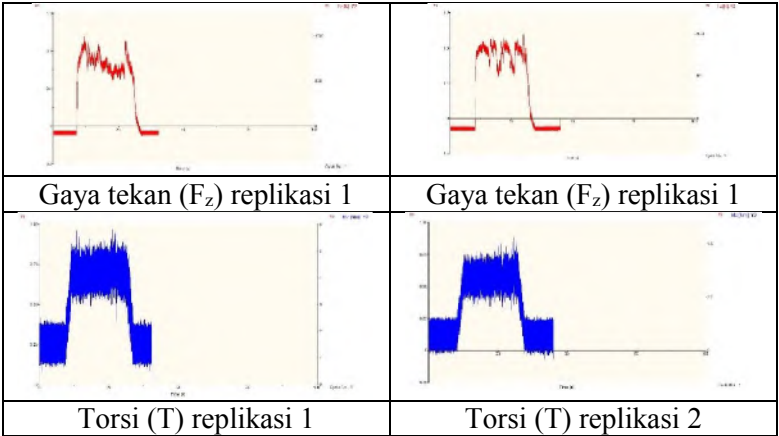
Kombinasi variabel proses 2231



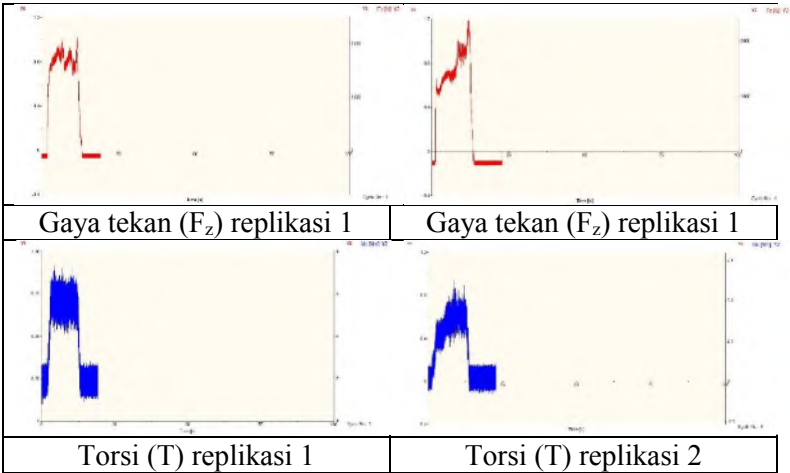
Kombinasi variabel proses 2313



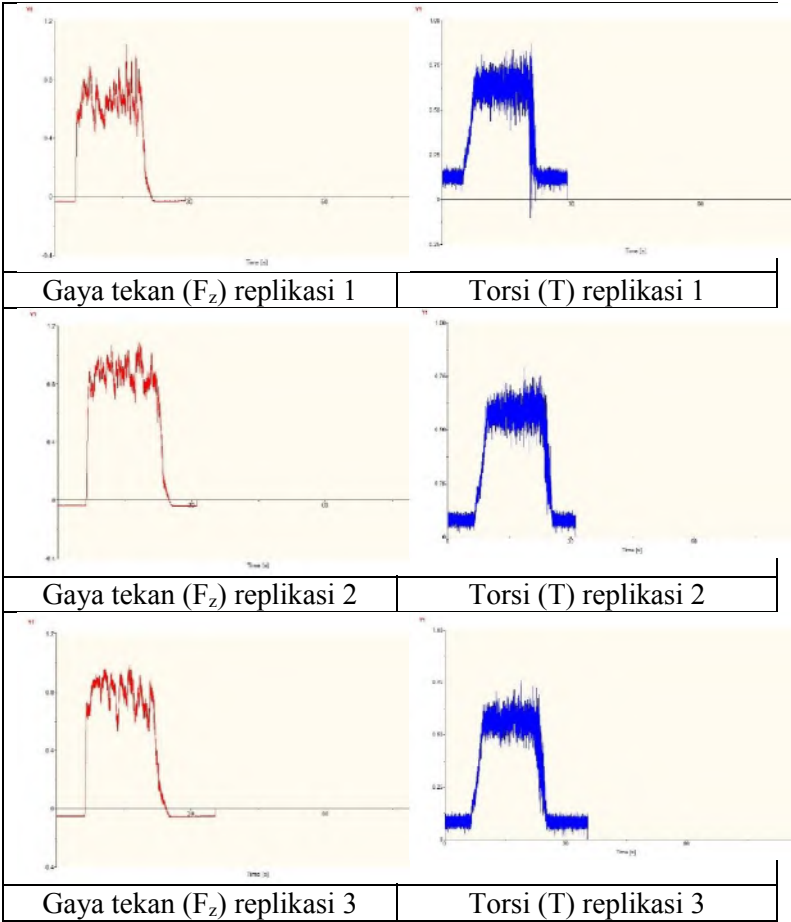
Kombinasi variabel proses 2321



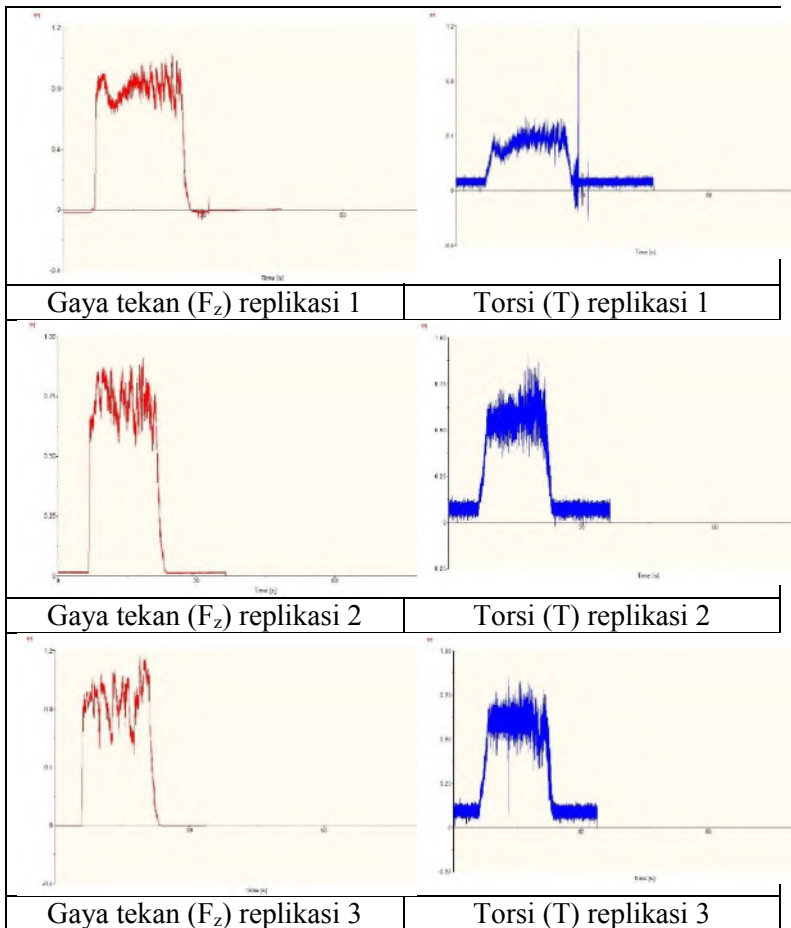
Kombinasi variabel proses 2332



Kombinasi variabel proses eksperimen konfirmasi 1131



Kombinasi variabel proses eksperimen level tengah 2222



LAMPIRAN 4
HASIL PENGUKURAN KEKASARAN PERMUKAAN
PADA PERCOBAAN REPLIKASI KE 1 DAN REPLIKASI
KE 2

No	JP	PA	f	Vc	Lokasi 1	Lokasi 2	R1 (µm)	Lokasi 1	Lokasi 2	R2 (µm)
1	1	1	1	1	4,35	4,33	4,34	4,38	4,36	4,37
2	1	1	2	2	3,32	3,40	3,36	3,41	3,4	3,41
3	1	1	3	3	4,21	4,30	4,26	4,12	4,35	4,24
4	1	2	1	1	3,94	4,10	4,02	3,94	3,89	3,92
5	1	2	2	2	2,92	2,89	2,91	2,88	3,01	2,95
6	1	2	3	3	3,71	3,68	3,70	3,65	3,68	3,67
7	1	3	1	2	2,51	2,43	2,47	2,46	2,53	2,50
8	1	3	2	3	3,61	3,57	3,59	3,56	3,57	3,57
9	1	3	3	1	4,53	4,68	4,61	4,32	4,51	4,42
10	2	1	1	3	4,01	3,98	4,00	4,11	3,89	4,00
11	2	1	2	1	4,62	4,56	4,59	4,45	4,79	4,61
12	2	1	3	2	4,89	4,85	4,87	4,51	4,79	4,65
13	2	2	1	2	3,98	4,05	4,02	4,1	4,04	4,07
14	2	2	2	3	3,57	3,68	3,63	3,49	3,71	3,60
15	2	2	3	1	5,74	6,21	5,98	6,34	5,72	6,03
16	2	3	1	3	3,17	3,25	3,21	3,21	3,33	3,27
17	2	3	2	1	4,38	4,32	4,35	4,36	4,29	4,33
18	2	3	3	2	4,26	4,27	4,27	4,31	4,11	4,21

Keterangan:

R1: replikasi 1

R2: replikasi 2

LAMPIRAN 5
HASIL PENGUKURAN KEAUSAN TEPI PAHAT PADA
PERCOBAAN REPLIKASI KE 1 DAN REPLIKASI KE 2


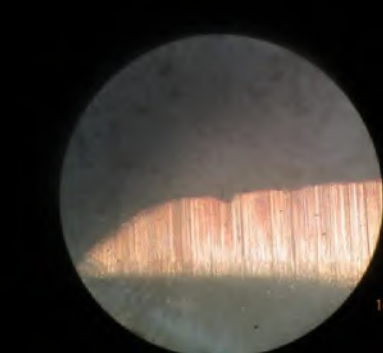
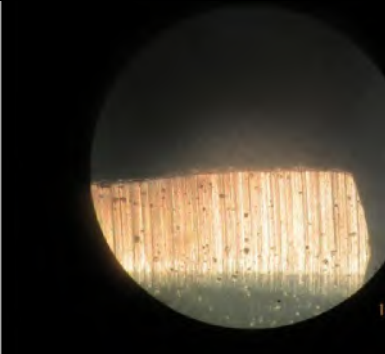
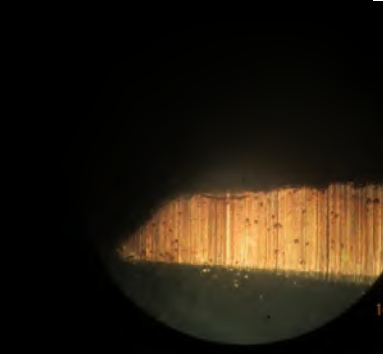
Replikasi 1

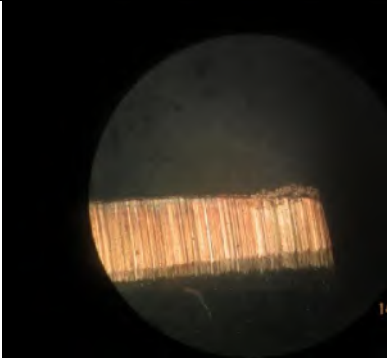
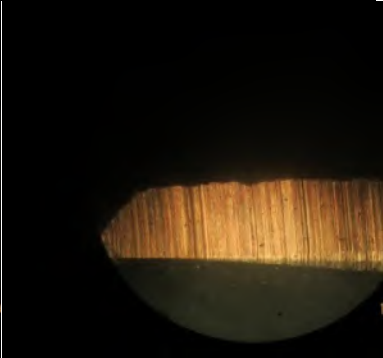
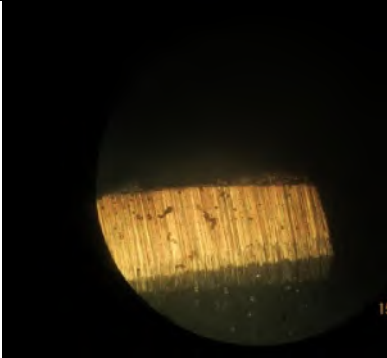
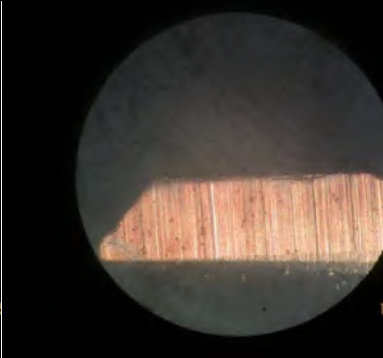
No	JP	PA	f	Vc	Lokasi						Rata-rata	VB1 (µm)
					1	2	3	4	5	6		
1	1	1	1	1	0,034	0,025	0,059	0,032	0,025	0,068	0,04042	40,42
2	1	1	2	2	0,024	0,031	0,081	0,028	0,039	0,074	0,04617	46,17
3	1	1	3	3	0,069	0,040	0,076	0,031	0,030	0,110	0,05933	59,33
4	1	2	1	1	0,034	0,042	0,050	0,032	0,048	0,023	0,03817	38,17
5	1	2	2	2	0,051	0,047	0,042	0,030	0,034	0,046	0,04167	41,67
6	1	2	3	3	0,046	0,053	0,042	0,043	0,051	0,059	0,04900	49,00
7	1	3	1	2	0,036	0,020	0,068	0,034	0,031	0,032	0,03683	36,83
8	1	3	2	3	0,035	0,034	0,026	0,030	0,038	0,065	0,03800	38,00
9	1	3	3	1	0,041	0,018	0,020	0,024	0,021	0,023	0,02450	24,50
10	2	1	1	3	0,038	0,036	0,086	0,043	0,038	0,130	0,06183	61,83
11	2	1	2	1	0,024	0,011	0,020	0,024	0,033	0,096	0,03467	34,67
12	2	1	3	2	0,029	0,033	0,063	0,021	0,031	0,058	0,03917	39,17
13	2	2	1	2	0,026	0,036	0,088	0,021	0,038	0,070	0,04650	46,50
14	2	2	2	3	0,035	0,031	0,064	0,055	0,059	0,060	0,05067	50,67
15	2	2	3	1	0,030	0,038	0,058	0,028	0,034	0,031	0,03650	36,50
16	2	3	1	3	0,035	0,038	0,030	0,041	0,041	0,048	0,03883	38,83
17	2	3	2	1	0,040	0,025	0,021	0,033	0,014	0,030	0,02717	27,17
18	2	3	3	2	0,024	0,030	0,045	0,022	0,018	0,019	0,02633	26,33

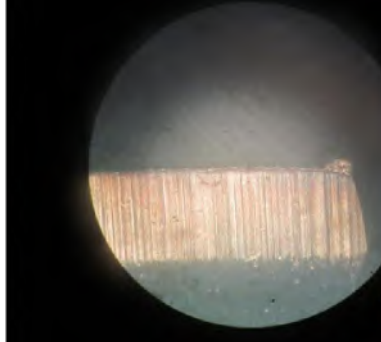
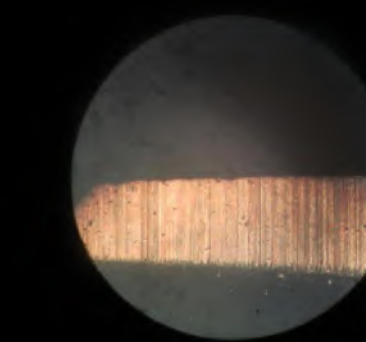
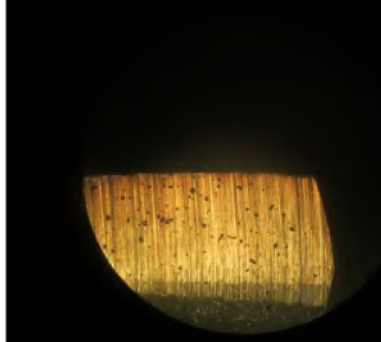
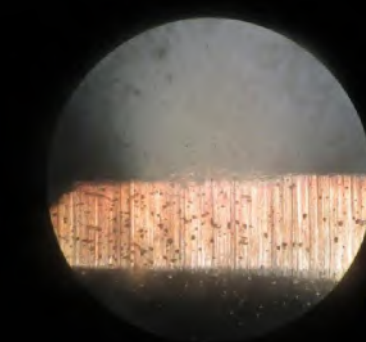
Replikasi 2

No	JP	PA	f	Vc	Lokasi						Rata-rata	VB2 (µm)
					1	2	3	4	5	6		
1	1	1	1	1	0,034	0,028	0,059	0,034	0,028	0,068	0,04183	41,83
2	1	1	2	2	0,028	0,034	0,071	0,031	0,038	0,079	0,04683	46,83
3	1	1	3	3	0,062	0,036	0,081	0,038	0,034	0,11	0,06017	60,17
4	1	2	1	1	0,031	0,049	0,051	0,032	0,052	0,024	0,03983	39,83
5	1	2	2	2	0,046	0,052	0,042	0,032	0,034	0,051	0,04283	42,83
6	1	2	3	3	0,053	0,065	0,039	0,045	0,048	0,051	0,05017	50,17
7	1	3	1	2	0,031	0,028	0,059	0,028	0,031	0,041	0,03633	36,33
8	1	3	2	3	0,035	0,034	0,031	0,035	0,036	0,073	0,04067	40,67
9	1	3	3	1	0,034	0,028	0,022	0,024	0,021	0,025	0,02567	25,67
10	2	1	1	3	0,042	0,056	0,069	0,048	0,054	0,098	0,06117	61,17
11	2	1	2	1	0,02	0,026	0,031	0,021	0,035	0,083	0,03600	36,00
12	2	1	3	2	0,03	0,035	0,059	0,026	0,031	0,055	0,03933	39,33
13	2	2	1	2	0,031	0,036	0,092	0,021	0,029	0,065	0,04567	45,67
14	2	2	2	3	0,038	0,046	0,051	0,04	0,046	0,076	0,04950	49,50
15	2	2	3	1	0,034	0,041	0,058	0,034	0,034	0,032	0,03883	38,83
16	2	3	1	3	0,035	0,036	0,046	0,04	0,03	0,041	0,03800	38,00
17	2	3	2	1	0,035	0,025	0,019	0,03	0,025	0,03	0,02733	27,33
18	2	3	3	2	0,024	0,0358	0,049	0,022	0,02	0,02	0,02847	28,47

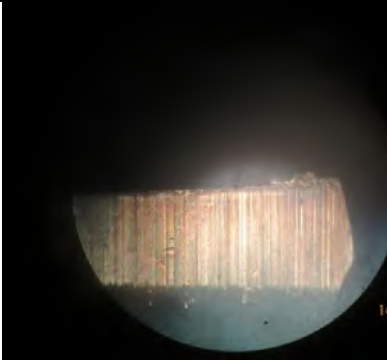
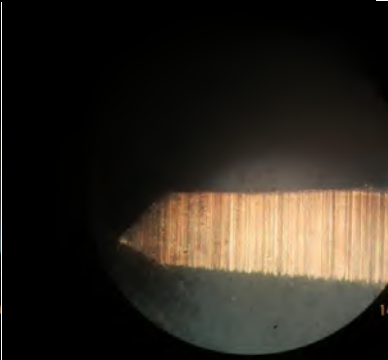
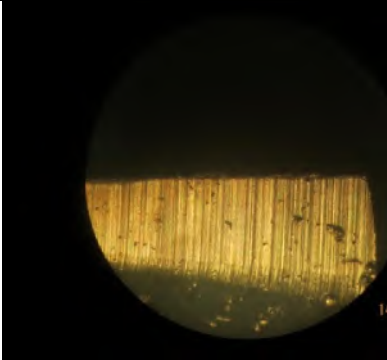
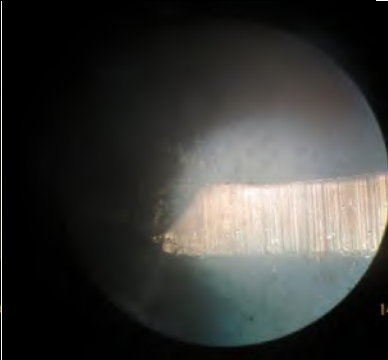
LAMPIRAN 6
KEAUSAN TEPI PAHAT EKSPERIMEN KONFIRMASI

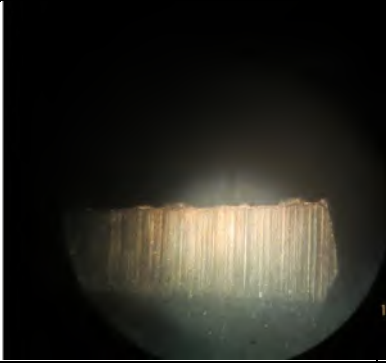

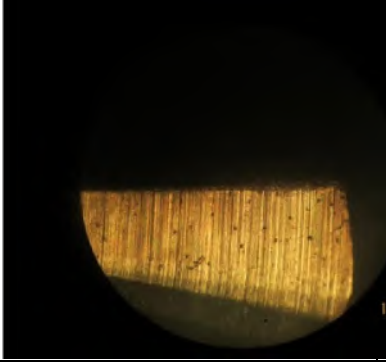
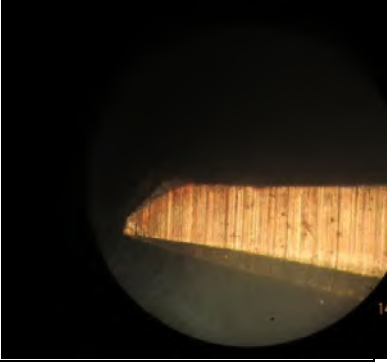
	
Pahat 1 sisi 1_1	Pahat 1 sisi 1_2
	
Pahat 1 sisi 2_1	Pahat 1 sisi 2_2

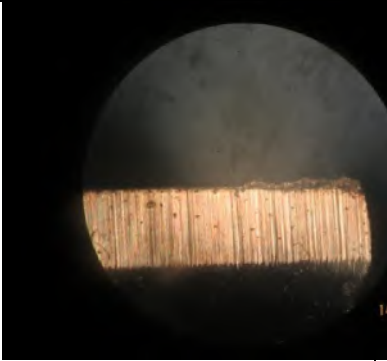
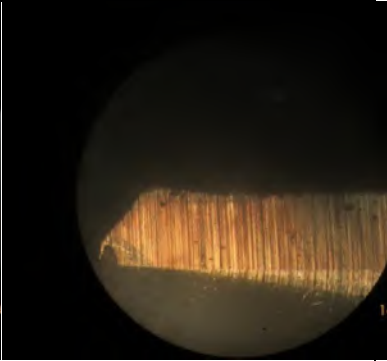
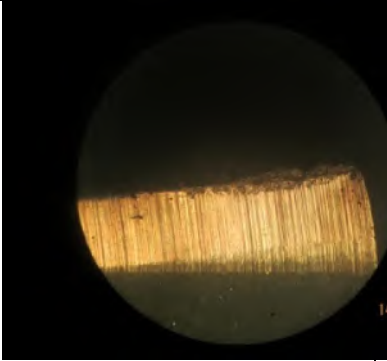
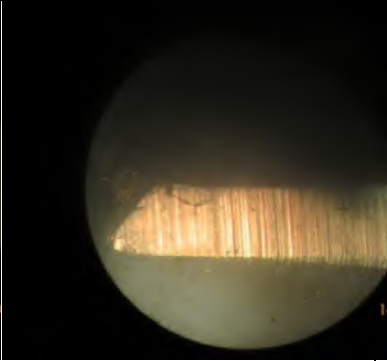
	
<p>Pahat 2 sisi 1_1</p>	<p>Pahat 2 sisi 1_2</p>
	
<p>Pahat 2 sisi 2_1</p>	<p>Pahat 2 sisi 2_2</p>

	
<p>Pahat 3 sisi 1_1</p>	<p>Pahat 3 sisi 1_2</p>
	
<p>Pahat 3 sisi 2_1</p>	<p>Pahat 3 sisi 2_2</p>

LAMPIRAN 7
KEAUSAN TEPI PAHAT EKSPERIMEN LEVEL TENGAH

	
Pahat 1 sisi 1_1	Pahat 1 sisi 1_2
	
Pahat 1 sisi 2_1	Pahat 1 sisi 2_2

	
<p>Pahat 2 sisi 1_1</p>	<p>Pahat 2 sisi 1_2</p>
	
<p>Pahat 2 sisi 2_1</p>	<p>Pahat 2 sisi 2_2</p>

	
Pahat 3 sisi 1_1	Pahat 3 sisi 1_2
	
Pahat 3 sisi 2_1	Pahat 3 sisi 2_2

LAMPIRAN 8
HASIL PENGUKURAN RESPON PADA EKSPERIMEN
KONFIRMASI DAN EKSPERIMEN LEVEL TENGAH

Hasil Eksperimen Konfirmasi pada Masing-masing Respon

No	Kombinasi variabel proses				F_z (N)	M_t (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Keausan tepi pahat (μm)
	JP	PA	f	Vc				
1	1	1	3	1	1441	3,432	5,45	50,96
2	1	1	3	1	1458	3,683	5,82	51,54
3	1	1	3	1	1448	3,539	5,66	51,25
Rata-rata					1449	3,551	5,64	51,25

Hasil Eksperimen Level Tengah pada Masing-masing Respon

No	Kombinasi variabel proses				F_z (N)	M_t (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Keausan tepi pahat (μm)
	JP	PA	f	Vc				
1	2	2	2	2	1568	3,522	6,21	55,42
2	2	2	2	2	1559	3,643	5,87	52,78
3	2	2	2	2	1575	3,621	5,98	54,93
Rata-rata					1567,33	3,60	6,02	54,38

LAMPIRAN 9 SPESIFIKASI PAHAT

SPECIFICATION DRILL Ø 10.0 MM

Parameter	Drill Putih (DIN 338)		
	Specification	HSS M2	HSS M35 (Cobalt)
Web Thickness (mm)	1.38 - 1.60	1.77	1.72
Helix angle (°)	29 - 31	28	29
Lip Clearance angle (°)	11 - 15	13	10
Chisel Edge angle (°)	125 - 135	140	125
Point angle (°)	116 - 120	118	134
Split Point	tidak		
Material Grade	M2		
Head Treatment	1200 °C / Tempering 3x		
Hardness VHN 30Kg	792 - 869	845	900
Chemical Composition Grade High Speed Steel M2			
Carbon (%)	0.78 - 0.88	0.86	0.96
Silicon (%)	0.20 - 0.45	0.352	0.35
Manganese (%)	0.15 - 0.45	0.32	0.402
Chromium (%)	3.75 - 4.50	4.490	5.23
Molybdenum (%)	4.50 - 5.50	4.880	4.9
Vanadium (%)	1.75 - 2.20	1.87	1.89
Tungsten (%)	5.50 - 6.75	4.87	4.76
Posphorus (%)	0.03 max	0.034	0.03
Sulfur (%)	0.03 max	0.010	0.005

LAMPIRAN 10 SPESIFIKASI UNIT MQL

Mist Spray Unit

Series LMU100/200

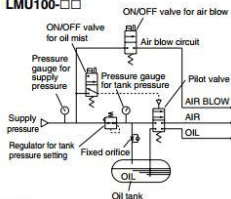
- Intermittent spray to cutting and press gear chains, etc.



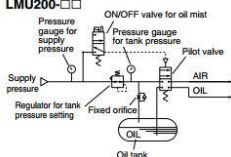
LMU100

Control Circuit

LMU100-□□



LMU200-□□



Standard Specifications

Model	LMU100	LMU200
Inlet air pressure	1.0 MPa	
Oil tank set pressure range	0.05 to 0.2 MPa	
Oil tank capacity (cm ³)	Total capacity: 3000	
	Effective capacity: 2500	
Ambient and fluid temperature	5 to 50°C	
Solenoid valve voltage	100 VAC 50/60Hz, 200 VAC 50/60Hz, 24 VDC	
Port size	SUP Rc 1/4	AIR : T0604 (ø6 tube) applicable
	OUT 3 x Rc 1/4	OIL : T0425 (ø4 tube) applicable
		AIR BLOW : T0806 (ø8 tube) applicable
Weight (kgf)	8.4	7.9

How to Order

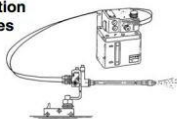
LMU 1 00 - 1 3				
Mist spray unit	Air blow circuit	Float switch		
1 Available	1 Available	0 None		
2 Not available	2 Not available	3 For the upper and lower limit control SW turns OFF when the float is on the upper side. SW turns ON when the float goes down. Contact capacity 50 VA AC, 50 V DC		
Rated voltage				
1 100 VAC (50/60 Hz)				
2 200 VAC (50/60 Hz)				
5 24 VDC				

Recommended Equipment

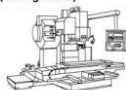
It is recommended to use each mist spray unit type with the mixing valves, magnet holders, branch pipes and nylon tubes listed in the table below.

Mist spray unit	Mixing valve	Magnet holder	Branch pipe	Nylon tube
This unit, with an oil tank and a spray ON/OFF control unit, sends oil and air from the mist spray unit using built-in oil and air needles, and also discharges oil mist from the nozzle.	This valve adjusts the amounts of oil and air from the mist spray unit using built-in oil and air needles, and also discharges oil mist from the nozzle.	This magnet holder enables the mixing valve installed on the arm end to be freely attached to the iron and steel parts such as machining tools, etc.	This pipe is used to separate oil and air from the mist spray unit when using several mixing valves.	This tube is used for the air piping and oil piping between the mist spray unit and the mixing valve.
LMU100-□□	LMV110-□□ LMV120-□□	LMH10	LMD1-□	OIL - T0425□ AIR - T0604□ AIR BLOW - T0806□
LMU200-□□	LMV210-□□ LMV220-□□	LMH20	LMD2-□	OIL - T0425□ AIR - T0604□

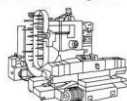
Application Examples



Standing type machining center (Drilling center)



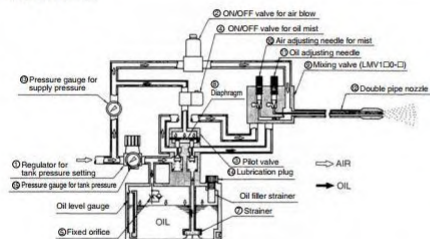
Horizontal machining center



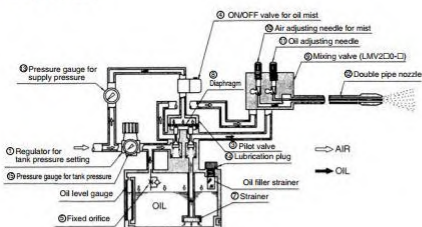
Series LMU

Construction/Working Principle

LMU100-□□



LMU200-□□



Working Principle

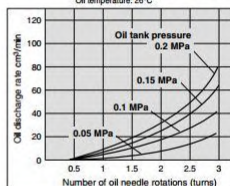
Of the compressed air from the air source, part is directed to the regulator for tank pressure setting (1), while the rest is directed to the ON/OFF valve for oil mist (4), which operates the ON/OFF valve for the air blow circuit (2) and the pilot valve for the mixing circuit (3). Compressed air at a prescribed setting determined by the regulator for tank pressure setting (1) passes through the fixed orifice (5) and gradually fills the oil tank (6), applying pressure to the OIL surface. The OIL in the tank passes through the strainer (7) and is drawn into the pilot valve (3). Operating the ON/OFF valve for oil mist (4) at this point will cause operating signal pressure to be conducted into the pilot valve (3), pushing the diaphragm (8) downwards, and as a result the compressed air from pilot valve (3) and oil from the opened valve will flow through their respective conduits and be drawn into the mixing valve (9).

Air and oil are adjusted with varying quantities by the air for mist from the mixing valve (9) and oil adjustment needles (10) and (11). With dual piping from the mixing valve (9) to the dual pipe nozzle (12), compressed air passes through the outside while oil passes through the inside, and at the tip of the dual pipe nozzle (12) they are sprayed out as a fine mist by the discharged air.

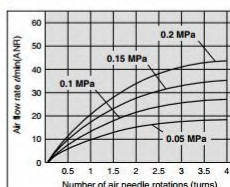
To remove cutting chips, operate the ON/OFF valve for air blow (2), which will cause the supplied compressed air to be drawn directly into the mixing valve (9) and blown out as air through the external piping of the dual pipe nozzle (12). To replenish oil, loosen the oil supply plug (14) to discharge the compressed air from inside the tank through the oil supply plug's side hole. Since it flows gradually from the fixed orifice (5) into the interior of the tank, it is easy to replenish oil from the oil supply hole.

Oil Discharge Rate (Representative Value)

Conditions: Oil: Turbine oil class 1 ISO VG32
Oil temperature: 35°C



Air flow rate (Representative Value)



Handling Precautions

Mounting

1. Be sure to mount an air filter corresponding to 5mm (equivalent to the SMC AF20) on the SUP side of the mist spray unit.

Adjustment

1. After loosening the tank's pressure-setting handle (by rotating it to the left), introduce air from the air source. Use the tank's pressure-setting handle and set the range from 0.05 to 0.2 MPa, set each control valve to ON (manual operation or energized), and inspect carefully to make sure there is no looseness in the fittings at each connecting point. At this time, be sure the air and oil adjustment needles of the mixing valve are in a completely closed position (by rotating it to the right.)

Lubrication

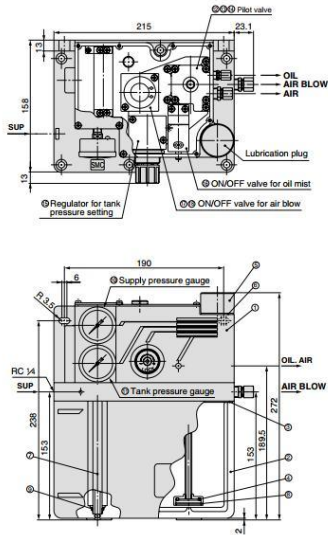
1. Completely release air in the OIL pipe. Even small amounts of air in the OIL pipe will cause oil to dribble. Fully open the oil adjustment needle of the mixing valve, and turn the ON/OFF valve for oil mist generation to the ON position, or press and hold down the manual button to release all air from inside the OIL pipe. If air buildup from use of branching pipes, etc. takes place inside the OIL pipe, mount an air release valve at the highest position and let the air out.

Be sure to carry out this operation when replenishing the oil after the oil tank becomes empty.

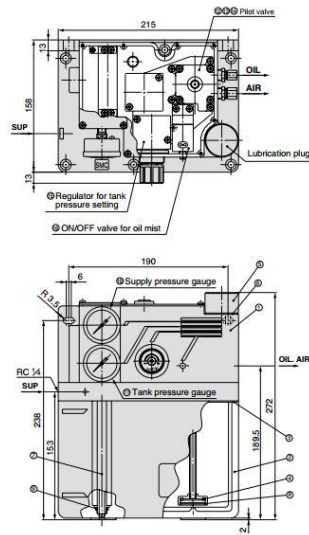
Mist Spray Unit **Series LMU**

Dimensions/Parts List

LMU100



LMU200



Main Parts List

No.	Description	Material	Note
1	Mist spray body	Aluminum die-casted	Platinum silver coated
2	Mist spray tank	Aluminum die-casted	Platinum silver coated

Spare Parts/Replacement Parts Part No.

No.	Description	Material	Qty.	Part no.	
				LMU100	LMU200
3	Body seal	NBR	1	81021-3	
4	Element	Bronze	1	81021-6	
5	Lubrication plug	Brass	1	81021-7	
6	Filler seal	—	1	81021-8	
7	Level gauge	Hard glass	1	81021-9	
8	Tap/Cleaning/reg. for tank	Stainless steel	1	JIS B2804 Nominal 30	
9	O-ring	FKM	2	JIS B2401 P11	
10	Pressure gauge	—	1	G40-10-D1	
11	Pressure gauge	—	1	G40-3-01-X289	
12	Pilot valve	—	1	81022P	
13	O-ring	NBR	1	JIS B2401 P3	
14	O-ring	FKM	2	JIS B2401 P12	
15	Regulator	—	1	INA-13-717	
16	Solenoid valve	—	1	VO301-001G-X212	
17	Solenoid valve	—	1	VO315-001G	
18	O-ring	NBR	4	JIS B2401 P8	

AL800
AL900

ALF
ALT

ALD

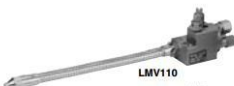
ALB

LMU

ALP

Related Products

Mixing Valve: Series LMV



Specifications

Inlet air pressure		0.3 MPa Max.
Ambient and fluid temperature		5 to 60°C
Port size	AIR	T0604 (ø6 tube) applicable
	OIL	T0425 (ø4 tube) applicable
	AIR BLOW	T0806 (ø8 tube) applicable

How to Order

LMV 110-20

• Mixing valve

1	Available
2	Not available

• Air blow circuit

1	Available
2	Not available

• Nozzle tubing construction

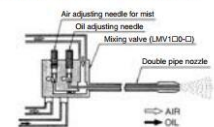
1	Flexible tubing
2	Copper tubing

• Nozzle tubing length: L

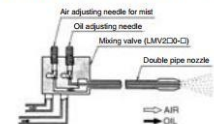
20	200 mm
25	250 mm
30	300 mm
35	350 mm

Construction

LMV1□0/With air blow circuit

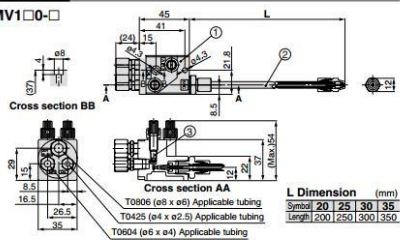


LMV2□0/Without air blow circuit



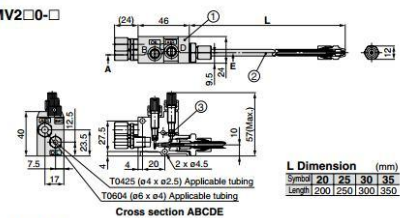
Dimensions

LMV10-0-0



L Dimension (mm)	
Symbol	20 25 30 35
Length	200 250 300 350

LMV2□0-□



L Dimension (mm)	
Symbol	20 25 30 35
Length	200 250 300 350

Main Parts List

No.	Description	Material	Note
1	Mixing valve body	Aluminum die-casted	Platinum silver coated

Spare Parts/Replacement Parts Part No.

No.	Description	Material	Qty.	Part no.	
				LMV□10	LMV□20
2	Flexible nozzle assembly	—	1	81023-2A-1 to 4 (Note 1)	—
	Copper piping nozzle assembly	—	1	—	81023-31A-1 to 4 (Note 1)
3	O-ring	EKM	2	123116-2	

Note 1) Numbers indicate nozzle lengths. -1: 200 mm, -2: 250 mm, -3: 300 mm, -4: 350 mm



LAMPIRAN 11

HASIL UJI STATISTIK

General Linear Model: Gaya tekan versus JP, PA, f, Vc

Factor	Type	Levels	Values
JP	fixed	2	1, 2
PA	fixed	3	1, 2, 3
f	fixed	3	1, 2, 3
Vc	fixed	3	1, 2, 3

Analysis of Variance for Gaya tekan, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
JP	1	83002	83002	83002	6.01	0.021
PA	2	936378	936378	468189	33.89	0.000
f	2	2212234	2212234	1106117	80.06	0.000
Vc	2	4321	4321	2160	0.16	0.856
Error	28	386869	386869	13817		
Total	35	3622804				

S = 117.545 R-Sq = 89.32% R-Sq(adj) = 86.65%

General Linear Model: Torsi versus JP, PA, f, Vc

Factor	Type	Levels	Values
JP	fixed	2	1, 2
PA	fixed	3	1, 2, 3
f	fixed	3	1, 2, 3
Vc	fixed	3	1, 2, 3

Analysis of Variance for Torsi, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
JP	1	0.5845	0.5845	0.5845	17.33	0.000
PA	2	6.6326	6.6326	3.3163	98.33	0.000
f	2	19.3426	19.3426	9.6713	286.76	0.000
Vc	2	0.0044	0.0044	0.0022	0.07	0.937
Error	28	0.9443	0.9443	0.0337		
Total	35	27.5085				

S = 0.183648 R-Sq = 96.57% R-Sq(adj) = 95.71%

General Linear Model: SR versus JP, PA, f, Vc

Factor	Type	Levels	Values
JP	fixed	2	1, 2
PA	fixed	3	1, 2, 3
f	fixed	3	1, 2, 3
Vc	fixed	3	1, 2, 3

Analysis of Variance for SR, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
JP	1	3.6195	3.6195	3.6195	38.95	0.000
PA	2	1.4858	1.4858	0.7429	8.00	0.002
f	2	5.9774	5.9774	2.9887	32.17	0.000
Vc	2	7.2244	7.2244	3.6122	38.88	0.000
Error	28	2.6016	2.6016	0.0929		
Total	35	20.9087				

S = 0.304821 R-Sq = 87.56% R-Sq(adj) = 84.45%

General Linear Model: VB versus JP, PA, f, Vc

Factor	Type	Levels	Values
JP	fixed	2	1, 2
PA	fixed	3	1, 2, 3
f	fixed	3	1, 2, 3
Vc	fixed	3	1, 2, 3

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
JP	1	29.25	29.25	29.25	2.93	0.098
PA	2	1480.93	1480.93	740.46	74.26	0.000
f	2	117.89	117.89	58.95	5.91	0.007
Vc	2	1491.50	1491.50	745.75	74.79	0.000
Error	28	279.21	279.21	9.97		
Total	35	3398.78				

S = 3.15782 R-Sq = 91.78% R-Sq(adj) = 89.73%

LAMPIRAN 12

SPESIFIKASI MINYAK SAWIT

LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Nama Pemilik : Muhammad Arizky

Alamat Pemilik : Teknik Mesin ITS

Nama Contoh : **Minyak Goreng Bimoli** Tanggal Terima : 20 Juli 2016

Deskripsi : Bentuk : Padat/Cair/Gas Tanggal Pengujian : 21 Juli 2016

Contoh Volume : - Tanggal Selesai : 22 Juli 2016

Kemasan : Botol Pengujian : 22 Juli 2016

Kode Contoh : **EI-0448** Jumlah Contoh : 1

Menyatakan bahwa contoh tersebut di atas telah diuji di Laboratorium Energi – LPPM ITS.

Hasil Pengujian

No.	Nama Contoh	Jenis Uji	Hasil	Satuan	Metode Pengujian
1	Minyak Goreng	Kinematik Viscosity at 40°C	43,66	Cst	ASTM D 445-97
		Kinematik Viscosity at 100°C	8,77		
		Flash Point	228	°C	ASTM D 93-00

Catatan:

1. Laporan Hasil Pengujian tidak boleh digandakan tanpa persetujuan tertulis dari Laboratorium Energi.
2. Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh yang diuji.
3. Hasil pengujian ini tidak dapat digunakan sebagai alat bukti hukum.

Mengetahui,
Manajer Teknis

Vita Yuliana, S.Si
NIPH. 914014001

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan yang meliputi eksperimen prediksi (optimasi) dan eksperimen konfirmasi, maka dari penelitian yang berjudul “Optimasi Multirespon Gaya Tekan, Torsi, Kekasaran Permukaan dan Keausan Tepi Pahat pada Penggurdian Baja EMS-45 dengan *Minimum Quantity Lubrication* (MQL),” dapat disimpulkan, bahwa:

1. Kontribusi dari variabel-variabel proses dalam mengurangi variansi total dari respon yang diamati yaitu gaya tekan (F_z), torsi (T), kekasaran permukaan (SR) dan keausan tepi pahat (VB) secara serentak adalah:
 - Jenis pahat (JP) sebesar 0,00%.
 - Sudut ujung pahat (PA) sebesar 0,00%.
 - Gerak makan (f) sebesar 89,92%.
 - Kecepatan potong (m/menit) sebesar 0,54%.
2. Pengaturan yang tepat dari kombinasi variabel-variabel proses untuk menurunkan respon yang diamati yaitu gaya tekan (F_z), torsi (T), kekasaran permukaan (SR) dan keausan tepi pahat (VB) secara serentak adalah:
 - Jenis pahat (JP) = HSS-M2
 - Sudut ujung pahat (PA) = 102°
 - Kecepatan makan (f) = 0,1 mm/rev.
 - Kecepatan spindel (V_c) = 25 m/menit.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan pemilihan variabel proses dan level dengan rentang yang tepat agar kondisi optimum dapat dicapai dengan akurat.
2. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan pahat gurdi baru pada setiap kombinasi variabel proses agar data yang dihasilkan lebih akurat.
3. Pengukuran kekasaran permukaan disarankan menggunakan alat pengukur kekasaran yang baru agar data yang dihasilkan lebih akurat.
4. Perusahaan dapat mengetahui performa dari kedua jenis pahat yang digunakan pada penelitian ini dan data yang diperoleh dapat digunakan untuk mengembangkan pahat yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Amran, M. A., S. Salmah., N. I. S. Hussein., R. Izamshah., M. Hadzley., Sivarao., M. S. Kasim., M. A. Sulaiman., 2013, "Effect of Machine Parameters on Surface Roughness using Response Surface Method in Drilling Process," *Procedia Engineering*. MITC2013. Session 68: 24-29
- Bhomwick, S., dan Ahmet, T. A., 2008, "Minimum Quantity Lubrication Drilling of Aluminium-Silicon Alloys in Water Using Diamond-Like Carbon Coated Drills," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol 48, pp. 1429-1443.
- Braga, D. U., A. E. Diniz., G. W. A. Miranda., N. L. Coppini., 2002, "Using a Minimum Quantity of Lubricant (MQL) and A Diamond Coated Tool in The Drilling of Aluminum-Silicon Alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, pp. 127-138.
- Datta, S., dan Mahapatra, S. S., 2010. "Modeling, Simulation, and Parametric Optimization of Wire EDM Process using Response Surface Methodology Coupled with Grey-Taguchi Technique." *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 2 (5),hal. 162-183.
- Deng, J., 1989. "Introduction to Grey System." *Journal of Grey System*, Vol. 1, pp. 1-24
- Dhar, N. R., S. Islama., M. Kamruzzaman., 2007, "Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel," *G.U. Journal of Science*, Vol. 20, pp. 23-32.
- Groover, M., 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. New York: John Wiley and Sons, Inc.

- Kalpakkjian, Serope., 1984, *Manufacturing Processes For Engineering Materials*, Michigan: University of Michigan.
- Kelly, J.F., and M.G. Cotterel., 2002, "Minimal lubrication machining of aluminium alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, pp. 327-334.
- Klocke, F., 2011, *Manufacturing Processes 1*, RWTH edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Lin, J. L., dan Lin, C. L., 2002. "The use of Orthogonal Array with Grey Relational Analysis to Optimize the Electrical Discharge Machining Process with Multiple Performance Characteristics." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.42, pp. 237-244.
- Montgomery, D. C., 2009. *Design and Analysis of Experiment*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Park, S. H., 1996. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering 1st edition*. London: Chapman & Hall.
- Rahim, E. A., H. Sasahara., 2010, "A Study of The Effect of Palm Oil as MQL Lubricant on High Speed Drilling of Titanium Alloys," *Tribology International*, Vol. 44, pp. 309-317.
- Rochim, T., 1993. *Proses Permesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rochim, T., 2001. *Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik, Modul 3 & 4*, Lab.Metrologi Industri, Departemen Teknik Mesin FTI - ITB, Bandung.
- Ross, P. J., 2008. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-HillCompanies, Inc., Taiwan.
- Soejanto, I., 2009. *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Syamsul, H., E. Widiyono., Winarto., D. Z. Noor., 2013. "EMS-45 Tool Steels Hardenability Experiment using Jominy ASTM A255 Test Method." *The Journal for Technology and Science*, Vol. 24 (1), pp. 7-12.

- Tosun, N., 2006. "Determination of Optimum Parameters for Multiperformance Characteristics in drilling by Using Grey Relational Analysis." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, pp. 450-455.
- Vankanti, V. K., dan Ganta, V. K., 2013. "Optimization of Process Parameters in Drilling of GFRP Composite Using Taguchi Method." *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3(1), pp. 35-41.
- Yildiz, Y. dan Nalbant, M. (2008), "A Review of Cryogenic Cooling in Machining Processes," *International Journal of Machine Tools & Tools Manufacture*, Vol. 48, pp. 947-964.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT PENULIS



Muhammad Arizky Rahmadillah Margo Agung dilahirkan di Banjarmasin pada tanggal 6 Juni 1992. Penulis merupakan putra pertama dari 3 bersaudara.

Penulis memulai pendidikan dasar di SD Negeri Teluk Dalam 3 dan lulus pada tahun 2004, lalu melanjutkan studi ke SMP Negeri 2 Banjarmasin dan lulus pada tahun 2007, kemudian penulis melanjutkan studi ke SMK Negeri 5 Banjarmasin, mengambil jurusan Teknik Pemesinan dan lulus pada tahun

2010. Setelah masa studi SMK selesai, penulis melanjutkan sekolah di Program Studi Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM (Universitas Gadjah Mada) dan lulus pada tahun 2013. Pada awal tahun 2014 penulis melanjutkan program sarjana di jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Terdaftar di Jurusan Teknik Mesin-ITS dengan Nomor Register Pokok 2113106017. Penulis mengambil Tugas Akhir dengan judul “Optimasi Multirespon Gaya Tekan, Torsi, Kekasaran Permukaan, Keausan Tepi Pahat pada Penggurdian Baja Perkakas EMS-45 dengan *Minimum Quantity Lubrication* (MQL)” dengan harapan agar ilmu yang telah didapatkan dapat berguna untuk agama dan negara. Penulis dapat dihubungi melalui email dibawah ini:

arizky.agung@yahoo.com atau arizkymargoagung@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)